

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Diagnostika obrábacieho stroja pomocou systému

Renishaw QC20-W Ballbar - CNC frézka

Machine Tool Diagnostic by Renishaw QC20-W Ballbar

System - CNC Milling Machine

Študent:

Bc. Jakab Tomáš

Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Jakab**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Diagnostika obráběcího stroje pomocí systému Renishaw QC20-W
Ballbar - CNC frézka
Machine Tool Diagnostic by Renishaw QC20-W Ballbar System - CNC
Milling Machine

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Měření přesnosti obráběcích strojů
3. Popis systému Renishaw Ballbar QC20W.
4. Experimentální měření vybraných obráběcích strojů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Ryszard Konderla, Ph.D.

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015


Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

PREHLÁSENIE ŠTUDENTA

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho a konzultanta diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave15. 5. 2015.....

.....
Bc. Jakab Tomáš

Prehlasujem, že

- bol som zoznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, hlavne §35 – použitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a použitie diela školského a §60 – školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nevýlučne ku svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu použiť (§35 odst. 3).
- súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej práce bude v elektronickej forme uložený v Ústrední knihovně VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej práce. Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo zajednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bolo zjednané, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorení diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave

15. 5. 2015

Meno a priezvisko autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bc. Tomáš Jakab

Bystrická cesta 2138/124,
034 01 Ružomberok

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

JAKAB, T. Diagnostika obrábacieho stroja pomocou systému Renishaw QC20-W Ballbar - CNC frézka: diplomová práca. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 51 s., 1 příloha. Vedúci práce: Ing. Robert Čep, Ph.D.

Diplomová práca sa zaoberá problematikou presnosti obrábacích strojov, v tomto prípade CNC frézky. V úvode diplomovej práce je spracovaná teória a základná problematika presnosti a jej merania, vrátane presnosti obrábania na strojoch. Hlavnú časť práce tvorí experimentálna časť, ktorá sa zaoberá diagnostikou CNC frézky pomocou meracieho prístroja Ballbar QC20-W od firmy Renishaw. Na základe praktických meraní boli stanovené závery k jednotlivým meraniam. Výsledky meraní v podobe grafov a odchýlok kruhovitosti sú uvedené v elektronickej forme na CD.

ANNOTATION OF THESIS

JAKAB, T. Machine Tool Diagnostic by Renishaw QC20-W Ballbar System - CNC Milling Machine: Master thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2015, 51 p., 1 annex. Thesis head : Ing. Robert Čep, Ph.D.

The Master's thesis deals with the problematic of machine tools accuracy, in this case, a CNC milling machine. The theory as well as the basic issues of accuracy of its measurement, including a precision machining, is elaborated in the introduction. The main part of the Master's thesis consists of experimental part, which deals with a diagnosis of CNC milling machine using a Ballbar QC20-W measuring instrument from the Renishaw company. Conclusions on individual measurements were specified on the basis of practical analysis. Its results in the form of graphs and circularity deviations are indicated in an electronic form on a CD.

OBSAH

ZOZNAM POUŽITÉHO ZNAČENIA, SKRATIEK A TERMÍNOV	8
1 ÚVOD	10
2 PRESNOSŤ	12
2.1 MERANIE PRESNOSTI	14
2.2 DIAGNOSTIKA KRUHOVOU INTERPOLÁCIOU	15
2.3 DIAGNOSTIKA LASEROVÝM INTERFEROMETROM	16
3 PRESNOSŤ OBRÁBACIEHO STROJA	18
3.1 METODIKA ZISŤOVANIA PRESNOSTI OBRÁBACIEHO STROJA	20
3.1.1 Požiadavky na konštrukciu obrobkov	20
3.1.2 Požiadavky na presnosť	21
3.1.3 Požiadavky na kvalitu materiálu	21
3.1.4 Požiadavky na obrábanie a meranie	21
3.2 PARAMETRE PRESNOSTI OBRÁBACIEHO STROJA	23
3.3 PRÍČINY VZNIKU NEPRESNOSTI OBRÁBACIEHO STROJA	25
4 DIAGNOSTIKA SYSTÉMOM RENISHAW QC20-W BALLBAR	26
4.1 O SPOLOČNOSTI RENISHAW	26
4.2 TELESKOPICKÉ SYSTÉMY BALLBAR	26
4.3 ČO JE RENISHAW BALLBAR?	27
4.4 TECHNICKÉ PARAMETRE SYSTÉMU BALLBAR QC20-W	29
5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	30
5.1 POPIS MERANIA	30
5.2 PRIAMA METÓDA MERANIA	32
5.3 ODCHÝLKA KRUHOVITOSTI	34
5.4 VÝHODNOTENIE PRIAMEJ METÓDY MERANIA	35
5.4.1 Oblúk snímania dát	35
5.5 BALLBAR DIAGNOSTIKA	36
5.6 ISO 230 - 4 DIAGNOSTIKA	39
5.6.1 Odchýlka v smere hodinových ručičiek	39
5.6.2 Odchýlka v protismere hodinových ručičiek	42
5.6.3 Obojsmerná odchýlka	44

6	VYHODNOTENIE MERANIA SYSTÉMOM BALLBAR	47
6.1	TECHNICKÉ ZHODNOTENIE	47
6.2	EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE.....	47
7	ZÁVER	48
	POUŽITÁ LITERATÚRA.....	50
	ZOZNAM PRÍLOH.....	51

Zoznam použitého značenia, skratiek a termínov

Δ_p	odchýlka polohy	(mm)
Δ_t	odchýlka tvaru	(mm)
Δ_r	odchýlka rozmeru	(mm)
R_{max}	drsnosť povrchu	(μm)
M_{si}	skutočný rozmer	(mm)
M_m	menovitý rozmer	(mm)
NC	číslicovo riadený obrábací stroj	(-)
CNC	počítačom riadený obrábací stroj	(-)
ISO	medzinárodná technická norma	(-)
STN	slovenská technická norma	(-)
ASME	norma pre kontrolu strojov	(-)
ÚNMS SR	Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR	(-)
K1, K2, K3	triedy presnosti v poradí podľa vzrastajúcej presnosti	(-)
I, II, III, IV, V	triedy presnosti strojov	(-)
HSC	vysokorýchlostné obrábanie	(-)
CAD	Computer Aided Design (návrh za pomoci počítača)	(-)
CAM	Computer Aided Manufacturing (výroba za pomoci počítača)	(-)
D, Š, V	dĺžka, šírka, výška	(mm)

LCD	liquid crystal display (displej s kvapalnými kryštálmi)	(-)
USB	Universal Serial Bus (univerzálna sériová zbernica na počítači)	(-)
CW	ClockWise (smer hodinových ručičiek)	(-)
CCW	CounterClockWise (protismer hodinových ručičiek)	(-)
T	tolerancia kruhovitosti	(μm)
Δ	odchýlka kruhovitosti	(μm)
G	odchýlka kruhovitosti podľa Ballbaru	(μm)
Max.	maximálny (výkon, priemer, krútiaci moment)	(-)

1 Úvod

Kvalita výrobkov stále viac vstupuje do popredia a stáva sa jedným z veľmi diskutovaných a riešených problémov. Charakteristickým rysom súčasného technického rozvoja strojárskych výrobkov je jeho neustále urýchľovanie. Je to dané neustále sa diferencujúcimi potrebami odberateľov. Na strane druhej rastie produkcia a súčasne s tým sa zvyšujú nároky na kvalitu výrobkov a presnosť strojov. Zatiaľ čo skôr rozhodovala predajná cena, dnes rozhoduje stále viac kvalita výrobkov. Výrazne sa tiež prejavuje zvyšovanie nákladov na kvalitu, ku ktorým počítame náklady na nepodarky, prípadne ich opravu, reklamáciu zákazníkov, náklady na skúšanie a kontrolu.

Základom technického pokroku v rôznych odvetviach ľudskej činnosti je vysoká úroveň strojárskej výroby. Jej zdokonaľovanie, zefektívňovanie a rast kvality produkcie sú úzko späté s progresom v stavbe obrábacích strojov. Mechanické obrábanie patrí vo svete stále medzi najrozšírenejšie strojárské technológie a celosvetový trend, charakterizovaný vo vyspelých krajinách presýtením trhu výrobkami, výrazne uprednostňuje technológiu mechanického obrábania založenú na CNC - riadiacej technike a pružnej automatizácii ako vysoko pružnú adaptabilnú technológiu, schopnú rýchlo reagovať na inovačné zmeny vyplývajúce s požiadaviek trhu. [1]

Spomedzi mnohých ukazovateľov technickej úrovne obrábacích strojov má prioritné postavenie ich pracovná presnosť. Aby mohla obrobena súčiastka plniť funkcie, na ktoré je určená a mohla byť bez problémov automaticky montovaná do nadradených funkčných členov a podobne, môže sa jej skutočný tvar, povrch a rozmery líšiť od ideálneho tvaru, povrchu a rozmerov (ktoré sú definované výkresom súčiastky) len po určité hranice, zistené ako uspokojivé pre plnenie požadovaných funkcií.

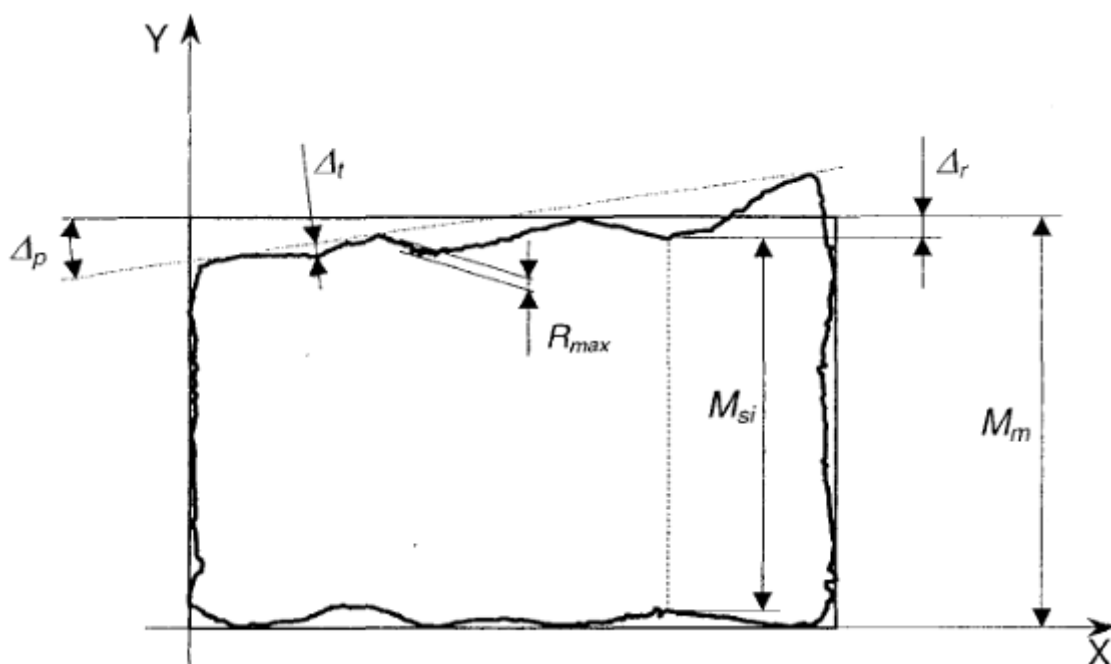
Presnosť obrábania a tým aj presnosť obrobku je ovplyvnená celým radom nepresností a odchýlok vznikajúcich v nosnom systéme stroja (pružné a tepelné deformácie telies nosného systému, stykové deformácie v pohyblivých i nepohyblivých spojeniach), v pohonoch jednotlivých výkonných členov, v riadiacom systéme, v odmeriavacích systémoch, na nástroji, prípravku i samotnom obrobku.

Neustály rast požiadaviek na kvalitu produkcie, ale aj kvalitu obrobkov vedie k tomu aby sa stále zdokonaľovali technológie obrábania, ale aj samotné obrábacie stroje čo má za následok, že obrábacie stroje sú stále zložitejšie a dokonalejšie mechatronické systémy, ktoré však zároveň rýchlejšie podliehajú morálnemu opotrebovaniu, než stroje dávnejšie vyrobené. Konštruktéri obrábacích strojov pri tvorbe nového stroja musia v pomerne krátkom časovom intervale hľadať optimálne technické riešenie, ako pre obrábací stroj v celku, tak i pre jeho jednotlivé funkčné celky, ich charakteristiky a vzájomnú koreláciu. Presnosť obrábania spolu s výrobnosťou určujú kvalitu produkcie a efektívnosť strojárskej výroby. Preto otázky zvyšovania presnosti či výrobnosti vždy stoja v popredí záujmu konštruktérov obrábacích strojov. [1]

2 Presnosť

Pod pojmom presnosť obrábania rozumieme stupeň zhody obrobenej súčiastky s jej geometrickým vzorom, ktorý je určený výkresom. Čím je táto zhoda väčšia, tým je presnosť obrábania vyššia. Na druhej strane príslušná odchýlka (chyba) predstavuje stupeň nezhody obrobenej súčiastky s príslušným geometrickým vzorom a nazývame ju nepresnosť.

Aby mohla ľubovoľná súčiastka plniť správne svoju funkciu, na ktorú je určená, môže sa jej skutočný tvar a povrch odchyľovať od tvaru a povrchu ideálnej súčiastky len v určitých prípustných medziach, ktoré boli zistené ako uspokojivé pre plnenie požadovanej funkcie. Určiť a zmerať nepresnosť každého bodu skutočného povrchu obrobenej súčiastky je prakticky nemožné. Z tohto dôvodu sa zaviedli a definovali príslušné druhy odchýliek – drsnosť povrchu, odchýlky tvaru, odchýlky polohy a odchýlky rozmerov od ich menovitých hodnôt. [1]



Obr. 2.1 - Druhy odchýliek skutočnej povrchovej plochy obrobku [1]

Pod pojmom drsnosť povrchu R_{max} rozumieme rozmerovo veľmi malé nepravidelnosti povrchu (v μm), ktoré na obrobenej súčiastke vznikajú ako stopy po ostrí nástrojov, brúsnych zŕn a pod. Veľkosť a tvar nepravidelností povrchu sú determinované spôsobom obrábania, fyzikálnymi vlastnosťami obrábaného materiálu, trením nástroja po obrobenej ploche, tuhosťou nástroja, akosťou a tvarom ostria, geometriou nástroja a reznými podmienkami.

Odchýlka tvaru Δ_t je určená rozdielom tvaru skutočnej plochy vzhľadom na ideálny tvar súčiastky. Do odchýlky tvaru s zahrňuje aj vlnitosť skutočnej plochy spôsobená hlavne kmitaním sústavy stroj – nástroj – obrobok.

Odchýlka polohy Δ_p je daná nepresnosťou vzájomného vzťahu dvoch prvkov (plôch, priamok, bodov), a to na jednej súčiastke, alebo na viacerých súčiastkach navzájom. Jej veľkosť závisí od spôsobu obrábania, pracovných podmienok, presnosti a tuhosti obrábacieho stroja, pri viacerých súčiastkach spolupôsobí aj vplyv montáže.

Odchýlka rozmeru Δ_r predstavuje rozmerovú nepresnosť skutočnej plochy vzhľadom na rozmer menovitej plochy. Matematicky je to teda rozdiel medzi skutočným rozmerom M_{si} a menovitým rozmerom M_m . [1]

Pri výrobe súčiastok nie je prakticky možné vyrobiť súčiastku s absolútnou presnosťou. Rozmery obrobenej súčiastky sa vždy líšia od menovitej hodnoty. Príslušná odchýlka je závislá od mnohých činiteľov, z ktorých najdôležitejším je výrobná operácia. Niektoré dokončovacie operácie umožňujú priblížiť sa k menovitému rozmeru veľmi blízko, takže rozdiel medzi skutočným rozmerom a predpísaným na výkrese je veľmi malý.

Celková nepresnosť obrábania je výsledkom celého radu faktorov. Každý z nich podporuje vznik prvotných charakteristických nepresností, z ktorých najdôležitejšie sú:

- nepresnosti spôsobené pružnými deformáciami technologickej sústavy stroj – nástroj – obrobok od rezných síl a odporov,
- nepresnosti spôsobené opotrebovaním ostria rezného nástroja,
- nepresnosti zoradenia stroja a ustavenia obrobku na stroji,
- nepresnosti spôsobené deformáciami obrobku od upínacích síl,
- nepresnosti vyvolané geometrickými a kinematickými nepresnosťami obrábacieho stroja,
- nepresnosti spôsobené geometrickými nepresnosťami rezného nástroja,
- nepresnosti spôsobené kmitaním technologickej sústavy.

Z uvedeného prehľadu základných faktorov ovplyvňujúcich presnosť obrábania vidíme, že rozhodujúcu úlohu pri zaistení presnosti výroby zohráva obrábací stroj a jeho presnosť. [1]

2.1 Meranie presnosti

Základným predpokladom úspešnosti každej výroby je produkcia kvalitných výrobkov. To, či sú výrobky kvalitné, je možné určiť meraním, ktoré je definované ako súbor činností na určenie hodnoty veličiny. Veda ktorá sa zaoberá meraním a všetkým čo s meraním súvisí, (meracie postupy, meradlá, chyby merania...) sa nazýva metroológia. Pri meraní presnosti používame overené meradlá. Overenie určeného meradla pozostáva zo skúšky meradla a potvrdenia jeho zhody so schváleným typom a technickými požiadavkami a metrologickými požiadavkami na daný druh meradla.

Meranie je súbor činností s cieľom určiť hodnotu veličiny (meraného objektu). Meranie sa môže vykonávať i autorizovane, t.j. osoba, ktorá vykonáva meranie, môže byť na túto činnosť autorizovaná, poverená ÚNMS SR. Pri meraní sa využívajú rôzne javy, ako veličiny na meranie, napr. termoelektrické javy na meranie teploty, Josephsonov jav na meranie elektrického napätia. Meracia metóda je logický postup operácií stanovený metrologickým predpisom.

Presnosť merania je tesnosť zhody medzi výsledkom merania a konvenčne pravou hodnotou meranej veličiny. Presnosť je kvalitatívny pojem a nedá sa priamo kvalifikovať, nedá sa kvantitatívne vyjadriť. Pri hodnotení kvality konkrétneho meradla nás zaujíma neistota merania meradla, ktorá je definovaná pre určité konštantné podmienky (teplota, tlak, vlhkosť, teplotný gradient, pozorovateľ).

Význam presností spočíva v experimentálnom fakte, že viaceré merania, ktoré sa týkajú toho istého objektu merania, dávajú údaje prístrojov navzájom rozdielne a tak vzniká otázka, do akej miery im možno dôverovať. Pri meraní získané údaje sú pod vplyvom chýb. Stále zdokonaľovanie prístrojov dáva stále menšie chyby. Ideálny systém merania by sa vyznačoval pravou hodnotou. Neexistuje prístroj, ktorý by bol schopný udávať pravú hodnotu merania, teda presnosť nemá teoretické hranice, ale iba hranice praktické. Nemáme žiadnu možnosť poznať pravú hodnotu. [4]

Sledovanie stavu stroja je hlavným predpokladom udržania kvality výroby, ako aj nutnou podmienkou v systémoch riadenia kvality podľa požiadaviek normy ISO 9001. Jednou z hlavných požiadaviek, vo výrobných prevádzkach je predvídať technický stav zariadenia a zabezpečiť čo najlepšiu kvalitu výroby s najmenším množstvom nezhodných produktov.

Monitorovanie stavu strojov umožňuje znižovanie nákladov na servisné služby a zároveň udržiava vysokú kvalitu výroby pomocou NC a CNC strojovej diagnostiky. Vďaka archivácii všetkých vykonaných meraní máme prehľad o predchádzajúcich meraniach a tie nám dávajú pohľad na prípadný zhoršujúci sa stav obrábacieho stroja. S touto klasifikáciou a jej pravidelným periodickým opakovaním možno znížiť náklady na neplánované odstávky stroja. Tým, že sa sleduje trend vývoja presnosti výroby, je možné naplánovať údržbu alebo opravu stroja skôr, než dôjde k významnému zlyhaniu a odstávke stroja na dlhšiu dobu. Tým sa výrazne znížia náklady spôsobené haváriou stroja. Zákazník získava prehľad o presnosti strojového parku, vrátane protokolov o presnosti strojov podľa požiadaviek normy ISO 9001. [2]

Pre diagnostiku NC a CNC strojov je dôležité najmä:

- kruhová interpolácia podľa ISO 230-4,
- meranie presnosti polohovania podľa ISO 230-1

2.2 Diagnostika kruhovou interpoláciou

Týmto meraním môžeme podchytiť geometrické odchýlky obrábacieho stroja (kolmost', priamosť, mŕtvy chod, priečna vôľa...), elektronické odchýlky (oneskorenie serva, vlečnú chybu, lineárnu chybu odmeriavania).

Vhodným zariadením na komplexnú diagnostiku posuvových mechanizmov obrábacieho stroja je Ballbar QC20-W. Kalibračný systém Renishaw QC20-W predstavuje ideálne a univerzálne riešenie nielen pre 3-osové obrábacie centrá. Presnosť stroja sa dá overiť testom trvajúcim maximálne 10 minút. Tento systém predstavuje najrýchlejší, najjednoduchší a najefektívnejší spôsob sledovania stavu obrábacieho stroja. Výkonná softvérová analýza umožňuje automatickú diagnostiku konkrétnych chýb, kde jednotlivé chyby sú usporiadané podľa významu z hľadiska celkovej presnosti stroja. [2]

2.3 Diagnostika laserovým interferometrom

Ďalším vhodným nástrojom na sledovanie geometrických nepresností obrábacích strojov je laserový interferometrický systém Renishaw XL-80. Tento vysoko modulárny systém umožňuje podľa vybavenia merať na pracovných osiach stroja lineárnu vzdialenosť, priamosť, rovinnosť, kolmosť, uhly, presnosť delenia rotačnej osi. Systém pracuje na základe svetelnej interferometrie. Základom je laserová hlava, ktorá vytvára stabilný laserový lúč. Okolité prostredie má vplyv na stabilitu vlnovej dĺžky laserového lúča, preto je súčasťou meracieho systému kompenzačná jednotka, ktorá zabezpečuje meranie teploty, tlaku, vlhkosti okolitého prostredia či teploty materiálu posúvacieho mechanizmu. Tým je meranie nezávislejším na zmenách okolitého prostredia a zaručuje presnosť lineárneho merania $\pm 1 \mu\text{m}$. Merací softvér umožňuje analýzu nameraných dát podľa viacerých medzinárodných noriem a doplnením programu pre kompenzáciu lineárnych chýb môžeme vytvoriť kompenzačné hodnoty pre rôzne riadiace systémy obrábacích strojov.

Meranie interferometrom ponúka:

- **Zvýšenie využiteľnosti stroja** - systém poskytuje podrobnú správu o zmenách presnosti stroja v čase. Na základe týchto údajov dokážeme vopred určiť požadované intervaly údržby a stanoviť presný stav stroja.
- **Zlepšenie výkonu stroja** - laserový iterferometer používaný k meraniu presnosti strojov umožňuje zlepšiť presnosť stroja prostredníctvom cielenej údržby a kompenzácií chýb.
- **Zvýšenie znalostí a výrobných schopností strojov** - pre potrebnú operáciu použijete ten správny stroj - každá operácia vyžaduje určité tolerancie a meranie zabezpečí príslušným strojom správne využitie k danému účelu a zníži pravdepodobnosť výroby nepodarkov.
- **Preukázanie presnosti strojov** - keď potrebujeme získať dôveru v kvalitu stroja alebo procesu, sú kalibračné grafy a výsledky pravidelného hodnotenia presnosti vynikajúcim dôkazom.
- **Splnenie postupov a noriem k zaisteniu kvality** - požiadavkám noriem kvality rady ISO 9000 je, aby výrobné a kontrolné zariadenie bolo kalibrované, monitorované a riadené uznávanými a sledovateľnými systémami a metódami. [3]

Silný potenciál má spolupráca meracích systémov QC20-W a XL-80, kde pravidelnou kontrolou pomocou QC20-W umožníme určiť príčinu nepresnosti obrábacieho stroja. XL-80 umožní kalibráciu posúvacích mechanizmov a QC20-W ich opätovnú kontrolu.

Okrem merania presnosti chodu pracovných jednotiek CNC strojov možno využiť aj ďalšie druhy diagnostiky:

- **Vibrodiagnostika** – je bezdemontážna metóda diagnostiky rotačných strojových zariadení, ktorá predstavuje súbor metód na získanie informácie o vibráciách. Pomocou vibrodiagnostiky dokážeme pomerne presne určiť príčinu a miesto poruchy.
- **Tribodiagnostika** – je metóda technickej diagnostiky bez demontáže, ktorá využíva mazivo ako médium na získanie informácií o zmenách v trecích uzloch. Výsledkom meraní sú informácie o stave cudzích látok v mazive. Pri tribodiagnostike sledujeme priebeh starnutia oleja v prevádzke a posudzujeme veľkosť zmeny intenzity a stupňa degradácie oleja na zmenu úžitkových vlastností a tým aj schopnosť oleja zabezpečiť bezporuchovú prevádzku.
- **Termografia** – je bezdemontážna metóda merania teploty, kde na základe merania energie vyžarovanej z povrchu objektu dokážeme určiť teplotu meraného objektu. [5]

Stanovenie nepresnosti CNC obrábacích strojov je veľmi zložitá úloha. Na stroj pôsobí veľa vplyvov, pretože všetky komponenty produkujú nejaké nepresnosti. Pomocou týchto metód, vieme získať kompletný prehľad o stave stroja. K týmto metódam merania môžeme pridať aj ďalšie metódy merania, ale treba brať do úvahy aj finančnú náročnosť jednotlivých meraní, a či nám výsledky meraní poskytnú informáciu o stave stroja s ohľadom na náklady spojené s meraním. [2]

3 Presnosť obrábacieho stroja

Presnosť obrábacieho stroja je vlastnosť, ktorá charakterizuje schopnosť stroja vyrábať súčiastky požadovaných tvarov a rozmerov s dodržaním požadovaných tolerancií a pri dosiahnutí požadovanej drsnosti povrchu.

Požiadavky kladené na presnosť obrábacích strojov vyplývajú z potrebnej presnosti súčiastok, ktoré sa majú na danom stroji vyrábať. Na jednom stroji sa spravidla obrábajú rôzne plochy súčiastok rôznych geometrických tvarov, je preto nevyhnutné dodržiavať presnosť väčšieho počtu základných rozmerových prvkov stroja. Sú to napr. rovinnosť a priamosť vodiacich plôch, súosovosť upínacích plôch, rovnobežnosť osí s vedeniami, kolmosť osí vretena s upínacou plochou stola a iné.

Presnosť obrábacieho stroja je determinovaná v prvom rade presnosťou jeho jednotlivých častí a uzlov. Tieto časti sú vyrábané normálnymi pochodmi strojárkej výroby, ich rozmery, tvary a vzájomné plochy sú na výkresoch určované s príslušnými toleranciami, ktoré sa musia pri výrobe a montáži presne dodržať. Pritom treba pamätať aj na drsnosti povrchov, ktoré musia zodpovedať funkcii príslušných plôch (klzná plocha, upínacia plocha, voľná plocha) a presnosti rozmeru.

Dodržaním predpísanej presnosti výroby a montáže častí obrábacích strojov môžeme dosiahnuť, takzvanú statickú presnosť obrábacieho stroja, nazývanú tiež presnosťou geometrickou. Geometrická presnosť obrábacieho stroja je daná presnosťou tvaru a polohy jeho jednotlivých strojových častí a ich vzájomných pohybov. Je nutným, ale nie postačujúcim predpokladom pre zabezpečenie požadovanej presnosti práce obrábacieho stroja. Závisí od nej presnosť tvaru relatívnej dráhy nástroja a obrobku obrobeneho na danom stroji.

Skúšky presnosti sa v zmysle noriem musia robiť po skúške stroja pri chode na prázdno a po skúškach stroja v prevádzke pri zaťažení na plný výkon, resp. maximálny krútiaci moment, alebo pri maximálnej reznej sile aj pri zaťažení hmotnosťou obrobku. Skúšky geometrickej presnosti obrábacieho stroja zahŕňajú zisťovanie všetkých odchýliek tvaru a polohy jeho jednotlivých častí na úplne zmontovanom stroji. Všetky meracie operácie musia byť navrhnuté tak, aby nebolo potrebné odmontovať žiadnu časť tvoriacu jeden funkčný celok zmontovaného stroja. [1]

Geometrická presnosť sa zisťuje v tepelne ustálenom stave stroja, ktorý zodpovedá jeho tepelnému stavu pri normálnych pracovných podmienkach. Najvhodnejšia teplota okolia pri meraniach je $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Kolísanie teploty pracovného prostredia počas skúšok nesmie prekročiť hodnoty uvedené v návode na obsluhu stroja alebo v príslušných normách pre presnosť konkrétneho druhu a typu obrábacieho stroja. Ak nie sú hodnoty inak definované, potom kolísanie teploty pracovného prostredia nesmie prekročiť pre stroje triedy presnosti III., IV. a V 2°C . Pre stroje tried presnosti I. a II. táto hodnota nie je definovaná.

Počas skúšok musia byť stroje chránené pred prúdením vzduchu, tepelným žiarením a inými zdrojmi tepla. Ak by výsledky merania mohlo v rozhodujúcej miere ovplyvniť teplo vznikajúce pri práci stroja, treba tieto merania vykonať po ukončení práce stroja pri chode naprázdno v súlade s údajmi v normách pre presnosť stroja alebo s údajmi v návode na jeho obsluhu. Na teplotu pracovného prostredia má byť stabilizovaná aj teplota meracích prístrojov. Podľa potreby sa vykoná korekcia vplyvu teploty na výsledky merania.

Chyby merania nesmú prekročiť 20 % hodnoty nameranej odchýlky pre stroje triedy presnosti I. a II., 25% pre stroje triedy presnosti III. a IV. a 30% pre stroje triedy presnosti V. Chyba, ktorá vznikne pri spracovaní číselných údajov merania, nesmie prekročiť 10% chyby merania. [1]

3.1 Metodika zisťovania presnosti obrábacieho stroja

Pri určovaní metodiky hodnotenia technického stavu obrábacieho stroja je potrebné vychádzať z údajov od výrobcu stroja. Výrobca stroj zaradí do triedy presnosti, to znamená, odchýlky namerané výrobcom sú najnižšie, aké na tomto stroji môžu byť. Ak odchýlky presahujú medzné stavy, stroj je buď poškodený alebo opotrebovaný do takej miery, že presnosť výrobkov vyrábaných na tomto stroji už nemôže byť zaručená. V takýchto situáciách je nutné pristúpiť ku celkovej alebo generálnej oprave stroja. Tieto úkony sú spojené s výdavkami a preto dobrý technický stav stroja je lepšie udržiavať ako vytvárať. Dá sa docieľiť kvalitnou obsluhou a údržbou.

Presnosťou strojov sa zaoberá celý rad noriem STN 20 0301 až STN 20 0389 konkrétne pre jednotlivé druhy typy obrábacích strojov. Väčšina metód meraní, pracovných postupov a vyhodnotení výsledkov meraní geometrickej a pracovnej presnosti obrábacích strojov, ktoré sú obsahom vyššie citovaných noriem STN, sa zhoduje s obsahom medzinárodných noriem ISO pre obrábacie stroje celosvetovej federácie národných normalizačných spoločností. Normy STN, ktoré sú identické s príslušnou medzinárodnou normou, prebrali jej označenie, ako napríklad STN ISO 1701 (20 0328: 1993).

3.1.1 Požiadavky na konštrukciu obrobkov

- Tvar skúšobných obrobkov musí odpovedať hlavnému určeniu stroja. Nie je možné použiť doplnujúce príslušenstvo, napr. otočné stoly, deliace prístroje.
- Rozmery skúšobných obrobkov podľa typu rozmerov stroja.
- Rozmery upínacích a dosadacích plôch stanoví výrobca stroja.
- Na meraných plochách nesmú byť otvory ani vybraná, ktoré nie sú uvedené v normách na presnosť konkrétnych druhov obrábacích strojov.
- U hranolových obrobkov je dovolené rozdeliť obrábané rovinné plochy drážkami na rad pozdĺžnych pásov v závislosti na počte na umiestnení pozdĺžnych meraných čiar. Šírka jedného obrábaného pásu sa volí podľa rozmerov skúšobnej drážky a metód obrábania. [8]

3.1.2 Požiadavky na presnosť

- Tolerancia tvaru dosadacích plôch hranolových skúšobných obrobkov nesmie prekročiť dovolené hodnoty, pre tolerancie tvaru meraných plôch, obrobených načisto, ktoré sú rovnobežné s dosadacími plochami.
- Tolerancia tvaru a polohy upínacích plôch a nahrubo obrobených meraných plôch hranolových obrobkov nesmie prekročiť 1,6 násobok hodnoty dovolených odchýlok pre merané plochy obrobené načisto.
- Drsnosť dosadacích plôch u obrobkov určených pre meranie drsnosti povrchu nesmie byť väčšia ako drsnosť načisto obrobených meraných plôch.

3.1.3 Požiadavky na kvalitu materiálu

- V prípade, keď vlastnosti materiálu môžu podstatne ovplyvniť výsledok merania, určujú sa doplnujúce požiadavky (na tvrdosť, pevnosť, štruktúru materiálu).
- Na meraných plochách obrobkov nesmú byť trhliny, lunkre ani mechanické poškodenia.

3.1.4 Požiadavky na obrábanie a meranie

- Potrebné podmienky obrábania stanovuje výrobca a musia zodpovedať podmienkam pre dokončovacie operácie.
- Hotové skúšobné obrobky sa prednostne kontrolujú mimo stroj (na meracej doske, na špeciálnom meracom zariadení). [8]

Samotné merania je možné vykonať rôznymi metódami, ku ktorým patrí napr. meranie pomocou kontrolného pravítka (uholníka) a prístroja na meranie dĺžky, meranie pomocou kontrolnej dosky a prístroja na meranie dĺžky, meranie pomocou vodováhy, autokoimátora, pomocou ďalekohľadu a zameriavacej značky, pomocou mikroskopu a napnutej struny, pomocou súradnicového meracieho stroja, kontrolného tŕňa, rovinného, valcového, alebo špeciálneho uholníka, pentagonálneho hranola a zameriavacej značky a podobne. Ďalšie metódy merania využívajú vysoko presné analógové snímače, taktiež optické zariadenia ako napríklad laser v podobe laserového interferometra a fotoelektrický snímač.

Výsledky skúšok presnosti sa zaznamenávajú do protokolu zo skúšky presnosti obrábacieho stroja, ktorý sa stáva súčasťou jeho sprievodnej dokumentácie. V tomto protokole sú uvedené základné identifikačné údaje stroja, názvy jednotlivých skúšok, dovolené odchýlky a namerané odchýlky.

Ako už bolo spomenuté, skúšky geometrickej presnosti sú len nutným, ale nie postačujúcim predpokladom pre presnú prácu obrábacieho stroja. Sú síce pomerne jednoducho a lacno realizovateľné a môžu odhaliť celý rad skrytých nedostatkov zapríčinených nedokonalosťou výroby a montáže obrábacieho stroja. Nemajú však veľkú vypovedaciu schopnosť o vlastnostiach stroja pri práci, teda pri zaťažení reznými silami a odpormi, kde sa prejaví dynamické vplyvy pohybujúcich sa častí stroja. Preto sa zaviedli skúšky pracovnej presnosti, ktorú niektorí autori zvyknú nazývať aj presnosťou dynamickou.

[8]

3.2 Parametre presnosti obrábacieho stroja

Presnosť obrábacieho stroja je determinovaná presnosťou pracovných pohybov jeho výkonných orgánov (vretená, suporty, stoly, šmykadlá) a ich relatívnou polohou pri práci. Hodnotenie presnosti obrábacích strojov sa uskutočňuje na základe parametrov, charakterizujúcich geometrickú presnosť strojov ako sú napríklad:

- presnosť základní pre ustavenie nástroja a obrobku,
- presnosť dráh pohybov výkonných orgánov,
- presnosť polohy výkonných orgánov,
- presnosť deliacich a nastavovacích pohybov výkonných orgánov,
- presnosť polohovania výkonných orgánov nesúcich nástroj, resp. obrobok,
- stálosť niektorých parametrov pri opakovanej kontrole (napr. pri nabehnutí na doraz a pod.).

Parametrov, charakterizujúcich presnosť obrábania skúšobných vzoriek, ako napríklad:

- presnosť geometrických tvarov a polôh obrobených plôch skúšobných obrobkov,
- stálosť rozmerov pre sériu skúšobných obrobkov,
- drsnosť obrobených plôch skúšobných obrobkov

Parametrov charakterizujúcich schopnosť zachovania vzájomnej polohy výkonných orgánov stroja nesúcich nástroj a obrobok za podmienok:

- pôsobenia vonkajšieho zaťaženia (statická tuhosť),
- pôsobenia tepla vznikajúceho za chodu stroja naprázdno (teplotná stabilita),
- pôsobenie chvenia, vznikajúceho za chodu stroja naprázdno.

Podľa toho, ako sú jednotlivé parametre splnené, rozdeľujeme potom obrábacie stroje do tried presnosti absolútnym alebo relatívnym systémom.

V absolútnom systéme klasifikácie presnosti strojov je stanovených päť tried presnosti označených podľa vzrastajúcej presnosti: I, II, III, IV, V. Do rovnakej triedy presnosti v absolútnom systéme patria stroje, ktoré zaručujú rovnakú presnosť obrábania tvarom aj rozmermi odpovedajúcich plôch skúšobných obrokov, a to nezávisle na druhu stroja.

V relatívnom systéme klasifikácie strojov podľa presnosti sú stanovené triedy presnosti označené K1, K2, K3 atď. V poradí podľa vzrastajúcej presnosti (K1 - bežná presnosť, K2 - zvýšená presnosť, K3 - vysoká presnosť). Rozdelenie strojov do tried presnosti v relatívnom systéme sa vykonáva podľa druhu strojov. Do triedy presnosti K1 patria stroje jedného druhu, ktorých presnosť odpovedá normám používaným v súčasnej svetovej praxi pre stroje bežného použitia. [9, 10]

Geometrická presnosť obrábacích strojov je určená:

- *Výrobnou presnosťou jednotlivých častí stroja* (rovinnosťou plôch, priamosťou plôch, súosovosťou otvorov, rovnobežnosťou osí s rovinou)
- *Presnosťou pohybov jednotlivých častí stroja* (čelného, obvodového a osového hádzania pracovných orgánov, rovnobežnosťou pohybu pracovného orgánu s rovinou alebo osou, kolmosťou pohybu pracovného orgánu k rovine alebo osi, kolmosťou dvoch posuvov, rovnobežnosťou dvoch posuvov) [9, 10]

3.3 Príčiny vzniku nepresnosti obrábacieho stroja

Za hlavný zdroj nepresností, ktoré do celkovej bilancie pracovnej presnosti obrábacieho stroja vnášajú vedenia pohyblivých uzlov, môžeme považovať lineárne premiestnenia a uhlové deformácie. Sú to napríklad naklopenia zapríčinené poddajnosťou stykových plôch (v prípade klzných vedení), poddajnosťou stykových plôch a valivých teliesok (v prípade vedení valivých), alebo poddajnosťou tlakového média (v prípade vedení hydrostatických, pneumatických alebo servostatických).

Okrem vyššie uvádzaných zdrojov nepresností sa na výslednej hodnote pracovnej presnosti obrábacieho stroja podieľa celý rad ďalších činiteľov:

- Deformácie obrobku vyvolané reznými silami, resp. vlastnou tiažou obrobku. Upnutie obrobku na stole, vo vretene alebo aj nepresnosti upínacích prípravkov.
- Nepresnosti transformačných mechanizmov v pohonoch, resp. servopohonoch výkonných činiteľov (gul'ôčková skrutka a matica).
- Nepresnosti indexovania otočných stolov, revolverových nástrojových hláv.
- Teplotné deformácie jednotlivých častí stroja spôsobené vnútornými zdrojmi (hnacie agregáty) a zdrojmi vonkajšími (z okolia stroja).
- Nepresnosti odmeriavacích zariadení priamočiarych alebo rotačných pohybov.
- Nepresnosti riadenia – zaraďujeme sem väčšinu nepresností spojených napríklad s číslícovým riadením a programovaním, interpoláciou.
- Nepresnosti nástroja – nepresnosti tvaru a rozmerov, nepresnosti nastavenia a upnutia nástroja, deformácie nástroja od rezných odporov, opotrebovanie a pod.

Uvedený stručný prehľad ďalších faktorov ovplyvňujúcich presnosť práce na obrábacom stroji nie je úplný a ani uzavretý. Existuje množstvo ďalších faktorov a príčin, ktoré ovplyvňujú presnosť obrábacích strojov.

4 Diagnostika systémom Renishaw QC20-W Ballbar

4.1 O spoločnosti Renishaw

Renishaw je globálna spoločnosť s kľúčovými odbornosťami v meraní, riadení pohybu, spektroskopii a presnom obrábaní. Vyvíjajú inovačné výrobky, ktoré výrazne posúvajú prevádzkové možnosti zákazníkov – od zlepšenia efektivity výroby a kvality výrobkov po maximalizáciu výskumných schopností a zlepšenie efektívnosti lekárskeho postupov.

Výrobky sa používajú v rozličných aplikáciách, ako je automatizácia strojného obrábania, súradnicové merania, doplnková výroba, merania, Ramanova spektroskopia, kalibrácia strojov, spätné informácie o polohe, stomatologické systémy CAD/CAM, zliatiny s tvarovou pamäťou, rozsiahle prieskumy, stereotaktická neurochirurgia a lekárska diagnostika. Vo všetkých týchto oblastiach sa snažia byť dlhodobým partnerom a ponúkajú vynikajúce výrobky, ktoré spĺňajú súčasné i budúce potreby zákazníkov, to všetko s prístupnou, odbornou technickou a obchodnou podporou. [6]

4.2 Teleskopické systémy Ballbar

Teleskopický systém Ballbar je takmer univerzálne považovaný za najpraktickejší, najpohodlnejší a najkomplexnejší testovací prístroj pre analýzu presnosti CNC obrábacích strojov. Systémy Ballbar od spoločnosti Renishaw sú na tomto trhu dominantné už viac ako 20 rokov a toto vedenie pokračuje i v dnešných dňoch pomocou bezdrôtových systémov Ballbar QC20-W.

Teleskopický systém Ballbar poskytuje jednoduchú a rýchlu kontrolu presnosti CNC obrábacích strojov v súlade s uznávanými medzinárodnými normami (napr. ISO, ASME apod.). Užívateľom umožňuje testovať a sledovať presnosť a rýchlo diagnostikovať problémy a zdroje chýb vyžadujúcich nápravu.

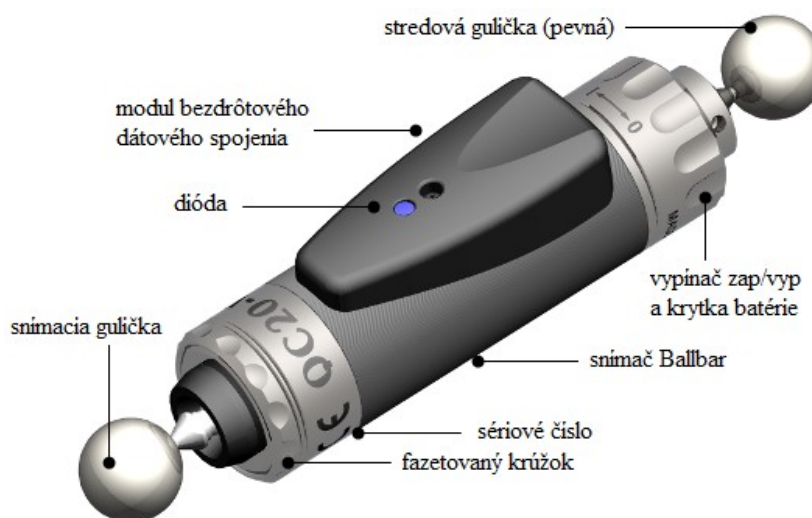
Pravidelné testovanie obrábacích strojov systémom Ballbar:

- zaručuje presnosť súčiastok vyrobených na CNC strojoch,
- znižuje prestoje, nepodarky a náklady na kontrolu stroja,
- pomáha k súladu prevádzkových parametrov stroja s normami riadenia akosti,
- vďaka zisteným zdrojom chýb napomáha ku včasnej a správnej údržbe.

4.3 Čo je Renishaw Ballbar?

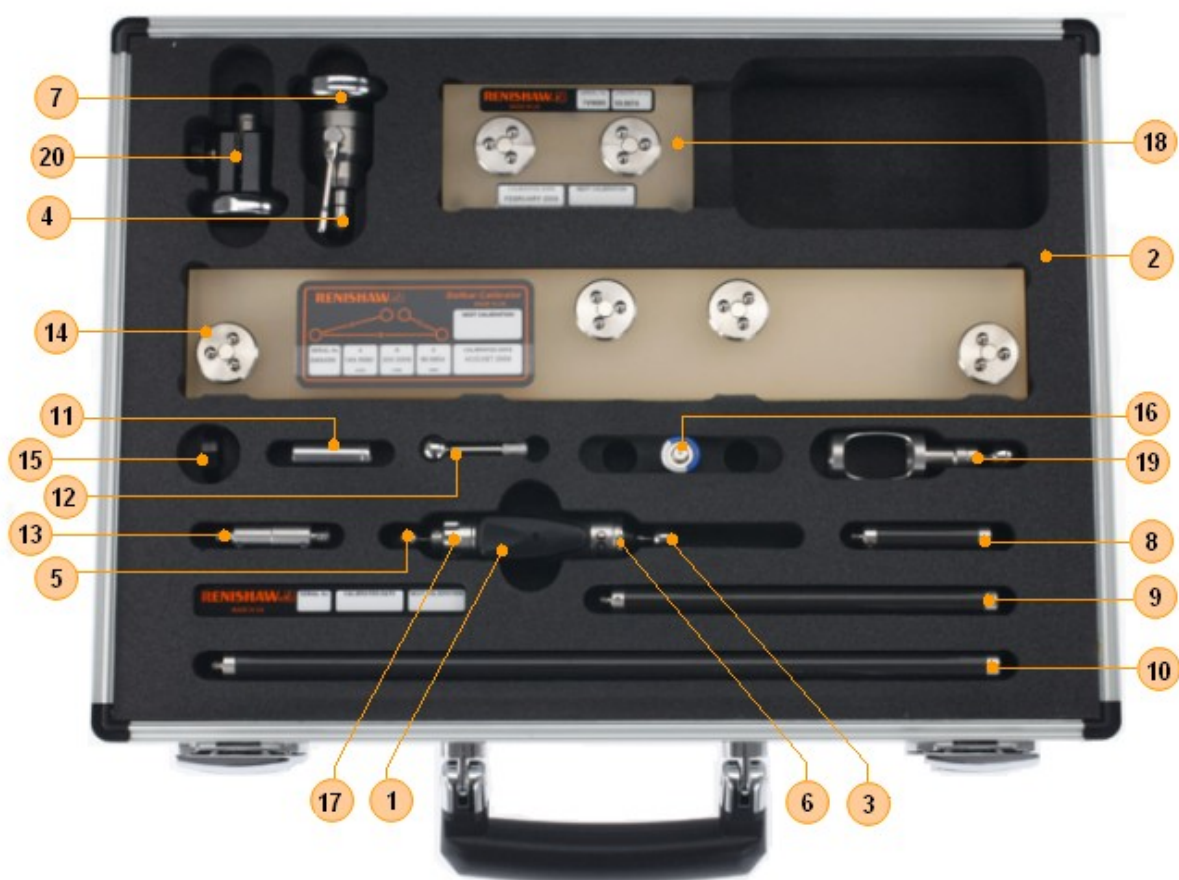
Systém Ballbar QC20-W spoločnosti Renishaw je zložený zo samotného Ballbaru (veľmi presného teleskopického lineárneho snímača a dvojice presných guľôčok na oboch koncoch) a z presných magnetických držiakov, z ktorých jeden (nastaviteľný) je pripevnený ku stolu stroja a druhý k vretenu stroja. Guľôčky snímača sú kinematicky vedené v magnetických miskách. Vďaka tomuto usporiadaniu je Ballbar schopný merať aj nepatrné zmeny polomeru naprogramovanej kruhovej dráhy okolo držiaku umiestneného na stole stroja.

Nasnímané dáta sú odoslané pomocou Bluetooth do počítača, v ktorom software Renishaw vypočíta celkové hodnoty presnosti (kruhovitosť, odchýlka kruhovitosti) v súlade s medzinárodnými normami ako sú ISO 230 - 4 a ASME B5.54, alebo s vlastnými analytickými protokolmi spoločnosti Renishaw. Protokol využíva jedinečnú matematickú analýzu k diagnostikovaniu mnohých ďalších chýb daného stroja zo sady lineárnych nameraných hodnôt. Dáta sú zobrazené graficky a taktiež v číselnom formáte ako pomôcka a podpora pre diagnostiku.



Obr. 4.1 - Renishaw Ballbar QC20-W [7]

Bežná súprava QC20-W obsahuje zostavu 100 mm dlhého Ballbaru a predĺžovacie nástavce v dĺžkach 50, 150 a 300 mm. Po zostavení Ballbaru s rôznymi kombináciami predĺžovacích nástavcov je možné robiť testy o polomere 100, 150, 250, 300, 400, 450, 550 a 600 mm. Gul'ôčkové držiaky novej konštrukcie (vrátane nového stredového otočného čapu a predĺžovacieho nástavca nástrojovej misky) umožňujú testy 220° v rovinách prechádzajúcimi osou stredového otočného čapu. To znamená, že systémom Ballbar môžete testovať v troch kolmých rovinách, pritom nie je nutné premiestniť stredový upínač, čo urýchľuje testovanie.



Obr. 4.2 – Súprava QC20-W v prenosnom kufríku [11]

1 - Zostava systému QC20-W, 2 - Kufrík pre uloženie systému, 3 - Gul'ôčka prevádzacieho prvku, 4 - Stredová miska, 5 - Stredová gul'ôčka, 6 - Krycí krúžok, 7 - Stredový otočný čap/stredový držiak, 8 - Predĺžovací nástavec 50 mm, 9 - Predĺžovací nástavec 150 mm, 10 - Predĺžovací nástavec 300 mm, 11 - Nástrojová miska, 12 - Nastavovacia gul'ôčka, 13 - Predĺžovací nástavec nástrojovej misky, 14 - Kalibrátor Zerodur, 15 - Sada kľúčov, 16 - Batéria CR2, 17 - Zostava krytky batérie, 18 - Kalibrátor Zerodur pre malé polomery, 19 - Adaptér pre malé polomery, 20 - Adaptér VTL

4.4 Technické parametre systému Ballbar QC20-W

Tab. 1 – Technické parametre

Rozlíšenie snímača	0,1 μm
Presnosť merania Ballbar*	$\pm (0,7 + 0,3\% L)$ μm
Rozsah meraní softwaru Ballbar	$\pm 1,0$ mm
Zdvih snímača	-1,25 mm až +1,75 mm
Max. rýchlosť snímania	1 000 Hz
Dosah prenosu dát (<i>Bluetooth</i> , trieda 2)	spravidla 10 m
Dosah signálu	0 °C – 40 °C
Rozmery kufríku (D x Š x V)	395 mm x 300 mm x 105 mm
Hmotnosť systémového kufríku, vrátane obsahu súpravy	približne 3,75 kg

* tiež sa označuje ako „radiálna odchýlka merania“ (platné pri 15 – 25 °C)

L = dĺžka, na ktorej je chyba meraná tzn.:

- špecifikácia pri meraní chyby 10 μm na stroji $\pm 0,73$ μm
- špecifikácia pri meraní chyby 100 μm na stroji $\pm 1,00$ μm

5 Experimentálna časť

5.1 Popis merania

Meranie sa uskutočnilo na CNC frézke HAAS CNC MiniMill. Frézka HAAS MiniMill má perfektnú veľkosť a výkonnosť pre menšie dielne. Kompaktná a populárna frézka HAAS MiniMill sa štandardne dodáva s pohonnou jednotkou 5,6 kW, 6000 ot./min., s vretenom a kužeľom ISO 40, ktoré jej poskytujú dostatok výkonu na obrábanie ocele a hliníka. Pracovný stôl má rozmery 914 mm × 305 mm, je perfektný na malé až stredné diely a dokáže jednoducho prijať otočný stôl HAAS na viacosové obrábanie. Maximálna záťaž na stole je 227 kg. Obsahuje automatický menič nástrojov s 10 kapsami, programová pamäť 1MB, 15" farebný monitor LCD a USB port. Približná cena je 26 995,00 € (základná výbava).



Obr. 5.1 – CNC frézka HAAS MiniMill [12]

Tab.2 – Technické parametre CNC frézky HAAS CNC MiniMill

DRÁHY POJAZDU	METRICKÝ
Os X	406 mm
Os Y	305 mm
Os Z	254 mm
STÔL	METRICKÝ
Dĺžka (pracovný priestor)	914 (730) mm
Šírka	305 mm
Max. zaťaženie stolu	227 kg
VRETENO	METRICKÝ
Max. výkon	5,6 kW
Max. rýchlosť	6000 rpm
Max. krútiaci moment	45 Nm @ 1200 rpm
POSUV	METRICKÝ
Rýchloposuv na X, Y, Z	15,2 m/min
Max. pracovný posuv	12,7 m/min
ZÁSOBNÍK NÁSTROJOV	METRICKÝ
Typ	Carousel
Kapacita	10
Max. priemer nástroja (plný)	89 mm
Max. hmotnosť nástroja	5,4 kg
VŠEOBECNÉ	METRICKÝ
Požadovaný prívod vzduchu	113 L/min, 6.9 bar
Objem chladiacej kvapaliny	91 L
PRESNOSŤ	METRICKÝ
Presnosť polohovania	0,005 mm
Opakovateľná presnosť polohovania	0,003 mm

Meranie prebiehalo v centrálnej polohe. Za polohu centrálnu považujeme polohu využívanú najčastejšie. Keďže frézka má pracovný stôl celkom veľkých rozmerov, ale pracovný priestor je o niečo menší, nebolo možné uskutočniť merania na viacerých častiach stola. Meraním na viacerých miestach sme mohli potvrdiť, prípadne vyvrátiť predpoklad, že ak budeme vzorky obrábať v rôznych miestach pracovného stola, ich presnosť bude totožná.

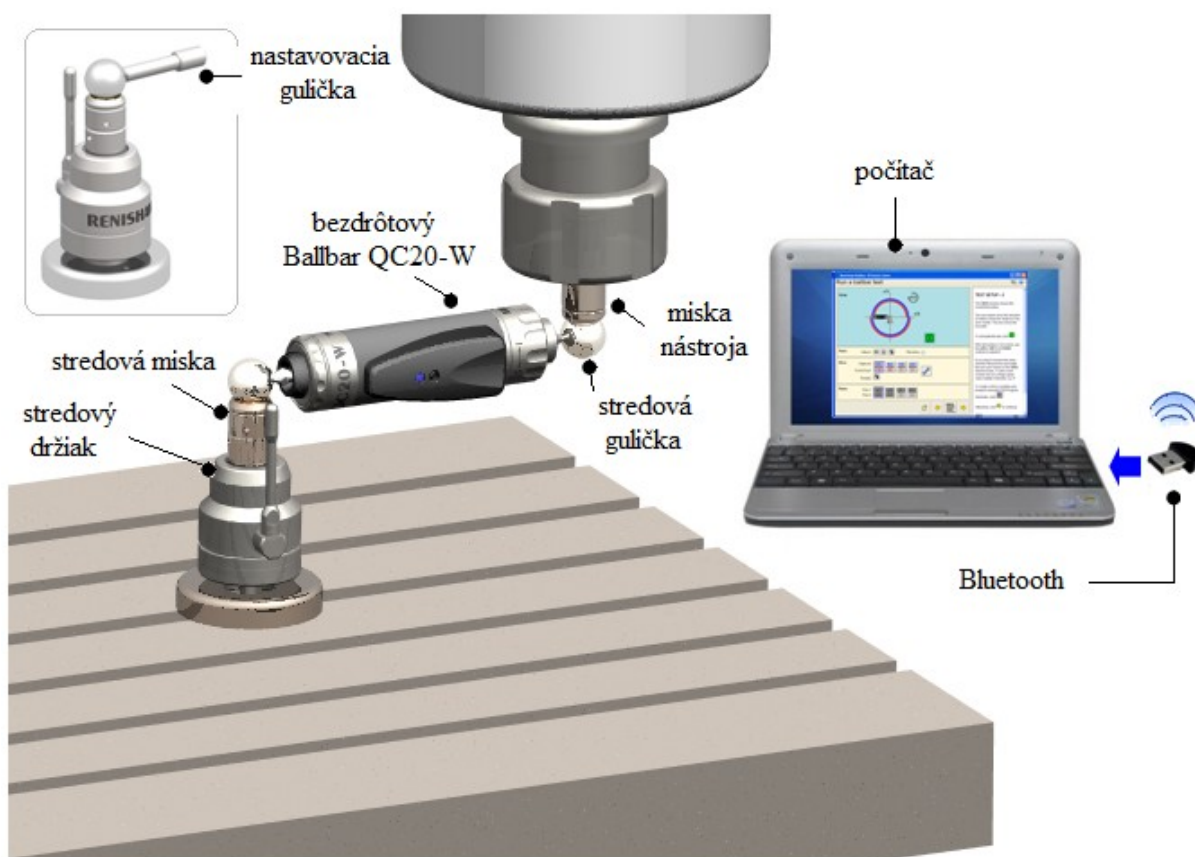
5.2 Priama metóda merania

Priama metóda merania je metóda merania, kde meranie prebieha priamo na obrábacom CNC stroji. Meranie prebiehalo v nezaťažených podmienkach stroja. Meranie odchýlky kruhovitosti bolo uskutočnené pomocou meracieho zariadenia Ballbar QC20-W od firmy Renishaw.

Postup merania:

- Frézku HAAS CNC MiniMill sme naprogramovali pomocou generátora ručného programovania Ballbar, ktorý automaticky vytvorí program odpovedajúci ovládaciemu systému stroja, tak aby opisoval kružnicu dvakrát v smere hodinových ručičiek (CW) a dvakrát v protismere hodinových ručičiek (CCW). Program bol prenesený pomocou USB zariadenia do počítača frézy.
- Na pracovný stôl bol umiestnený magnetický stredový držiak s guľovým kĺbom, zatiaľ bez aretácie. Do vretena obrábacieho stroja upneme magnetickú miskú, taktiež s guľovým kĺbom.
- Medzi magnetický stredový držiak a magnetickú miskú umiestnime nastavovaciu guľičku, ktorá má za úlohu vystrediť polohu stredového držiaka a magnetickej misky. Vreteno sa presúva do referenčného bodu a sú nastavené „nulové“ súradnice testu. Následne ručnou obsluhou frézy zabezpečíme dotyk týchto troch častí a magnetický stredový držiak môžeme zaaretovať.
- Po overení programu spustíme v počítači softvér Ballbar a následne spustíme program na stroji. Všetko to prebieha bez lineárneho snímača Ballbar, kvôli bezpečnosti.
- Vložíme lineárny snímač medzi magnetickú miskú a stredový držiak. Znova spustíme softvér v počítači a program na stroji. Po ukončení programu na obrábacom stroji, vykreslí softvér Ballbar odchýlku kruhovitosti pri nezaťaženom stroji. Dáta uložíme a pokračujeme v teste ďalej pri iných parametroch stroja.
- Meranie prebiehalo pri posuvových rýchlostiach 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 mm.min⁻¹.

Pracovný stôl pri priebehu skúšky merania kopíruje kružnicu priemeru 100 mm, kde lineárny snímač Ballbar má dĺžku 100 mm a otáča sa okolo osi vretena. Meranie prebiehalo pri teplote 21,30°C a vlhkosti 60%. Meracie zariadenie Ballbar sa najčastejšie používa na preventívnu údržbu a na identifikáciu problémov na obrábacom stroji. Obvykle sa dajú problémy zistiť ešte skôr ako sa použije Ballbar test. Čo sa týka presnosti meracieho zariadenia Ballbar, tak je aj nie je presný. Treba mať na pamäti, že meranie prebieha v nezaťažených podmienkach. Výrobca by mal zaručovať zhodu medzi meraním bez záťaže a so záťažou a taktiež zhodu pri obrábaní v rôznych miestach pracovného stola obrábacieho stroja. Jedná sa o natoľko účinnú diagnostiku, že mnoho svetových výrobcov obrábacích strojov a výrobných spoločností volí túto formu zobrazenia výsledkov za štandard.

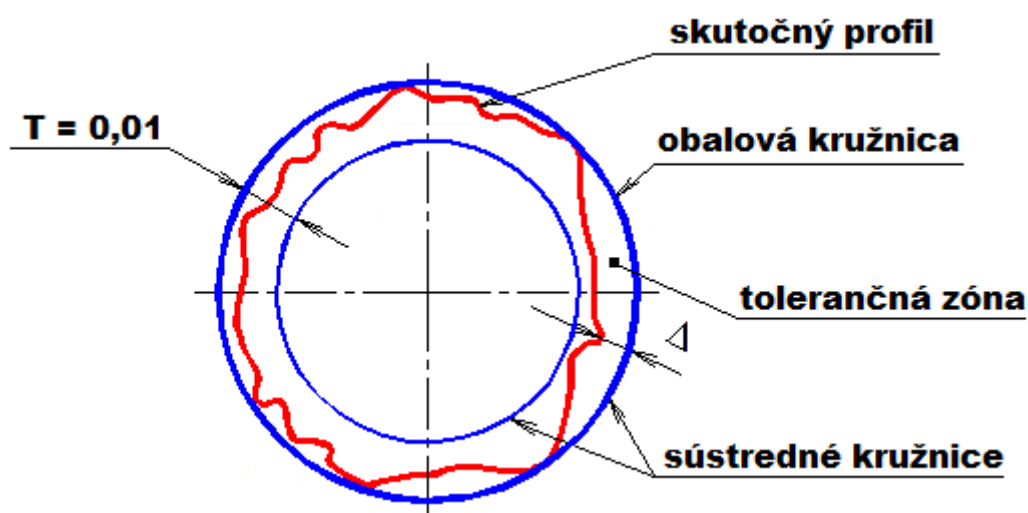


Obr. 5.2 – Schéma meracej metódy

5.3 Odchýlka kruhovitosti

Odchýlka kruhovitosti je najväčšia vzdialenosť bodov skutočného profilu od obalovej kružnice. Obalová kružnica je kružnica s najmenším priemerom opísaná okolo skutočného profilu vonkajšej rotačnej plochy, alebo kružnica s najväčším priemerom vpísaná do skutočného profilu vnútornej rotačnej plochy.

Kruhovitost' stredov kružníc a veľkosť ich polomerov sa musia zvoliť tak, aby radiálna vzdialenosť medzi dvoma sústrednými kružnicami bola čo najmenšia.



Obr. 5.3 – Odchýlka kruhovitosti [13]

Odchýlka kruhovitosti je najväčšia vzdialenosť Δ bodov skutočného profilu od obalovej kružnice. Tolerančná zóna kruhovitosti je oblasť v rovine kolmej na os rotačnej plochy ohraničená dvoma sústrednými kružnicami, vzdialenými od seba o šírku medzikružia rovnajúcu sa tolerancii kruhovitosti T . [13]

Spoločne s drsnosťou povrchu významne ovplyvňuje úroveň vibrácií rotujúcich častí a tým aj kvalitu celého zariadenia. Aj z tohto dôvodu je stále venovaná vysoká pozornosť zdokonaľovaniu metód hodnotenia tejto odchýlky a meracej technike. Vlastné meranie a vyhodnotenie nemá za úlohu len kvantifikovať veľkosť odchýlky, ale aj umožňovať získať informácie použiteľné v procese tvorby povrchu – obrábaní s cieľom korigovať a zlepšovať technologické postupy.

5.4 Vyhodnotenie priamej metódy merania

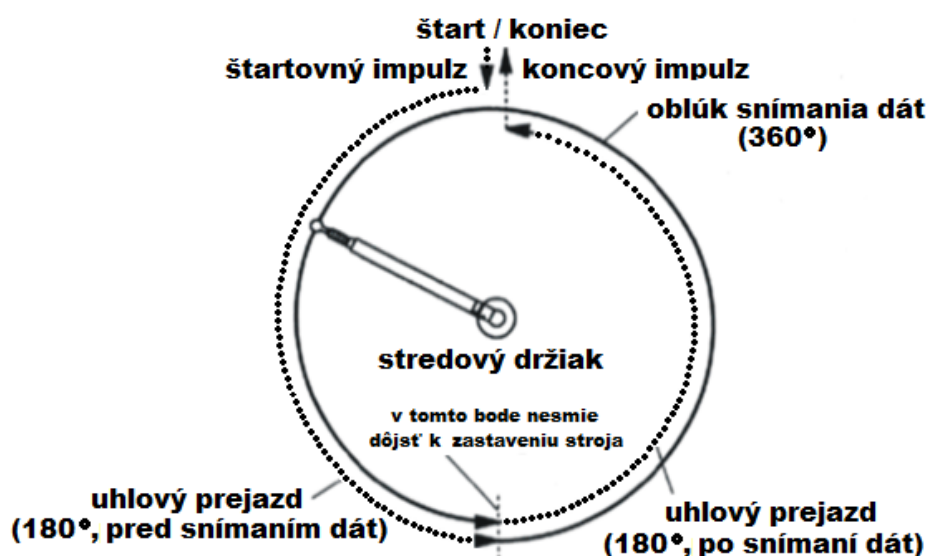
Pri vyhodnocovaní výsledkov merania bol použitý softvér Ballbar od firmy Renishaw dodávaný v balení. Vyhodnocovali sa odchýlky kruhovitosti pri nezaťaženom stroji pri rôznych posuvoch v rovine XY. Softvér obsahuje etalóny, podľa ktorých vyhodnocuje chyby stroja. Chyby sú vyjadrené percentuálnym pomerom, ale aj v mikrometroch. Závisí to od použitej normy na vyhodnotenie.

Pri priamej metóde boli hodnotené chyby stroja na základe grafov odchýlky kruhovitosti, ktoré vykreslil softvér. Hodnotené normou od Ballbaru a normou ISO 230-4.

5.4.1 Oblúk snímania dát

Oblúk snímania dát je dráha opísaná koncom prevádzacieho prvku Ballbaru, na ktorej software sníma a uchováva výstup získaný prevádzacím prvkom. Tento oblúk je obvykle situovaný medzi dvoma oblúkmi uhlového prejazdu. Veľkosť oblúku snímania dát môžeme určiť (v stupňoch) v rozpätí 0° až 360° . Napríklad u trojosého CNC stroja bude pre kalibráciu roviny ZX alebo YZ vyhovovať oblúk 180° alebo 220° a pre kalibráciu roviny XY oblúk 360° .

Dráhu tvorí špirála so smerom do stredu. Toto zobrazenie slúži len ku schematickým účelom. V skutočnosti je dráha kruhová s nominálne konštantným polomerom.



Obr. 5.4 – Oblúk snímania dát

5.5 Ballbar diagnostika

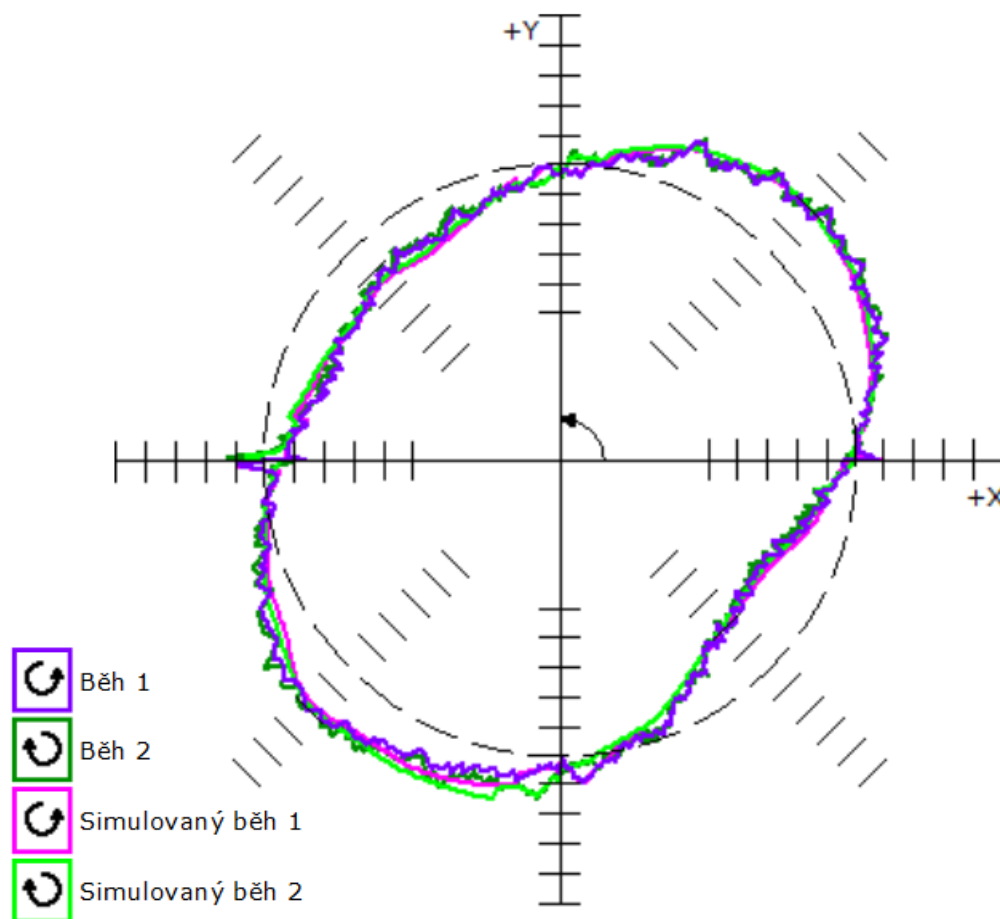
Formát komplexnej analýzy Renishaw Software Ballbar 20, okrem grafického zobrazenia, ohodnotí každú diagnostikovanú chybu podľa jeho vplyvu na celkovú presnosť stroja. Pre túto diagnostiku boli chyby vyjadrené v mikrometroch. Softvér môže okrem odchýlky kruhovitosti hodnotiť aj ďalšie chyby ako napríklad mŕtvy chod, oneskorenie serva, priečnu vôľu, nezhodu serva, kolmosť a iné.

Tab. 3 – Hodnoty odchýlok kruhovitosti podľa Ballbar softvéru

č. m.	POSUVOVÁ RÝCHLOSŤ [mm.min ⁻¹]				
	1000	2000	3000	4000	5000
1.	10,70 μm	11,00 μm	10,80 μm	12,30 μm	20,00 μm
2.	10,30 μm	10,80 μm	10,50 μm	11,50 μm	20,80 μm
3.	10,30 μm	10,20 μm	10,20 μm	10,90 μm	19,60 μm
4.	10,50 μm	10,30 μm	10,30 μm	10,90 μm	19,80 μm
Ø	(10,45 ± 0,16) μm	(10,575 ± 0,33) μm	(10,425 ± 0,25) μm	(11,40 ± 0,57) μm	(20,05 ± 0,45) μm

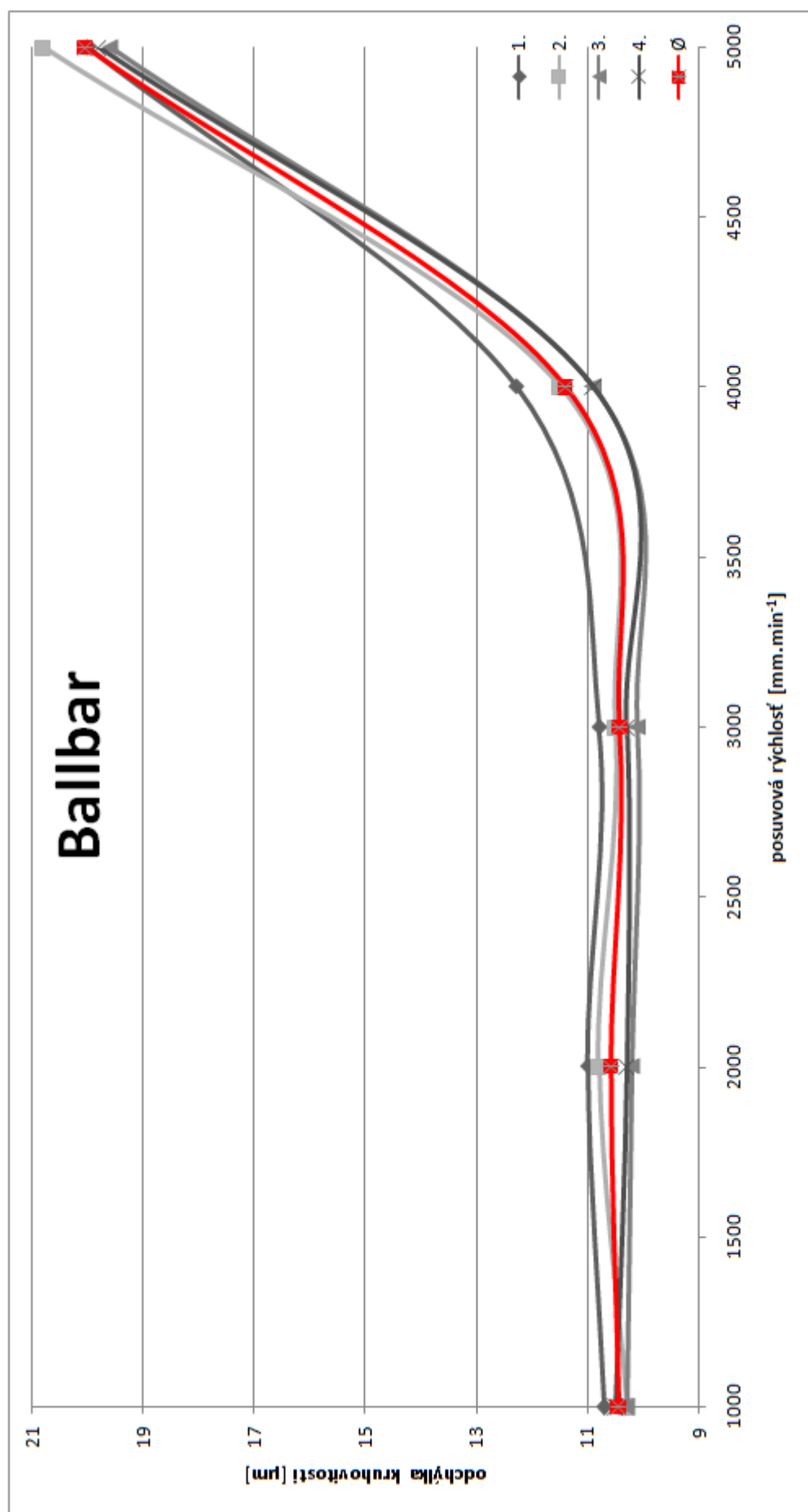
Tabuľka zobrazuje hodnoty, pri ktorých Ballbar opisoval kružnicu dvakrát v smere hodinových ručičiek (CW) a dvakrát protismere hodinových ručičiek (CCW). Namerané hodnoty boli spriemerované a k nim sa doplnila aj smerodajná odchýlka merania. Keďže každý merací prístroj má svoju triedu presnosti, preto výsledky našich meraní sa budú mierne líšiť. Meranie sa opakovalo viackrát, preto bolo potrebné vytvoriť smerodajnú odchýlku.

Použitá Ballbar diagnostika nedokáže rozdeliť meranie na dve časti ako iné normy, tak výsledkom je len jeden graf. V grafe sú zobrazené oba smery spoločne. Odchýlka kruhovitosti pri posuvovej rýchlosti 3000 mm.min^{-1} pri 3. meraní dosahovala hodnotu $10,20 \text{ }\mu\text{m}$, čo zobrazuje graf na Obr. 5.5.



Obr. 5.5 – Graf odchýlok kruhovitosti pri 3000 mm.min^{-1}

Graf (Obr. 5.6) zobrazuje hodnoty z tabuľky 3. Od posuvovej rýchlosti 1000 mm.min^{-1} až do rýchlosti 3000 mm.min^{-1} sú hodnoty skôr lineárne a pohybujú sa v rozmedzí od $10,20 \text{ }\mu\text{m}$ až do $11,00 \text{ }\mu\text{m}$. Od rýchlosti 4000 mm.min^{-1} hodnoty odchýlky kruhovitosti stúpajú exponenciálne, čo znamená, že pri zvyšovaní posuvovej rýchlosti narastá odchýlka kruhovitosti a tým sa zvyšuje nepresnosť stroja pri obrábaní.



Obr. 5.6 – Graf odchýlok kruhovitosti

5.6 ISO 230 - 4 diagnostika

Výpočet sa uskutočňuje s použitím len dát behu CW / CCW, po predchádzajúcom individuálnom zoradení behu, aby bola odstránená akákoľvek odchýlka stredu. Stredová odchýlka je hodnota, o ktorú sa stredový držiak odchýli zo stredu ideálneho kruhu prechádzajúceho snímanými dátami. Po nasnímaní dát program vyhodnotí a vypočíta ideálny kruh.

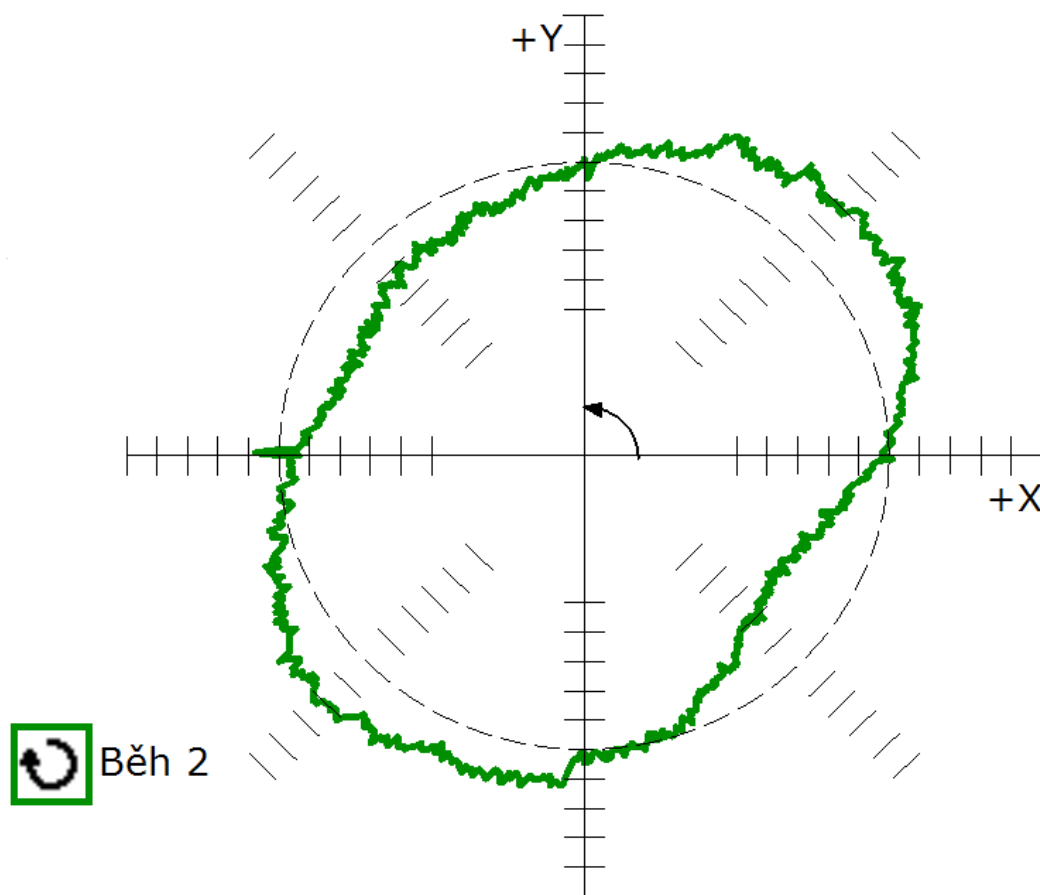
5.6.1 Odchýlka v smere hodinových ručičiek

Tab. 4 – Hodnoty odchýlok – smer hodinových ručičiek

CW - ClockWise - smer hodinových ručičiek					
č. m.	POSUVOVÁ RÝCHLOSŤ [mm.min ⁻¹]				
	1000	2000	3000	4000	5000
1.	10,50 μm	10,50 μm	10,40 μm	11,40 μm	19,80 μm
2.	10,40 μm	10,40 μm	10,40 μm	11,20 μm	19,50 μm
3.	10,20 μm	9,80 μm	10,20 μm	10,50 μm	18,70 μm
4.	10,60 μm	9,30 μm	10,30 μm	10,10 μm	19,30 μm
Ø	(10,425 ± 0,14) μm	(10,00 ± 0,48) μm	(10,325 ± 0,08) μm	(10,80 ± 0,52) μm	(19,325 ± 0,40) μm

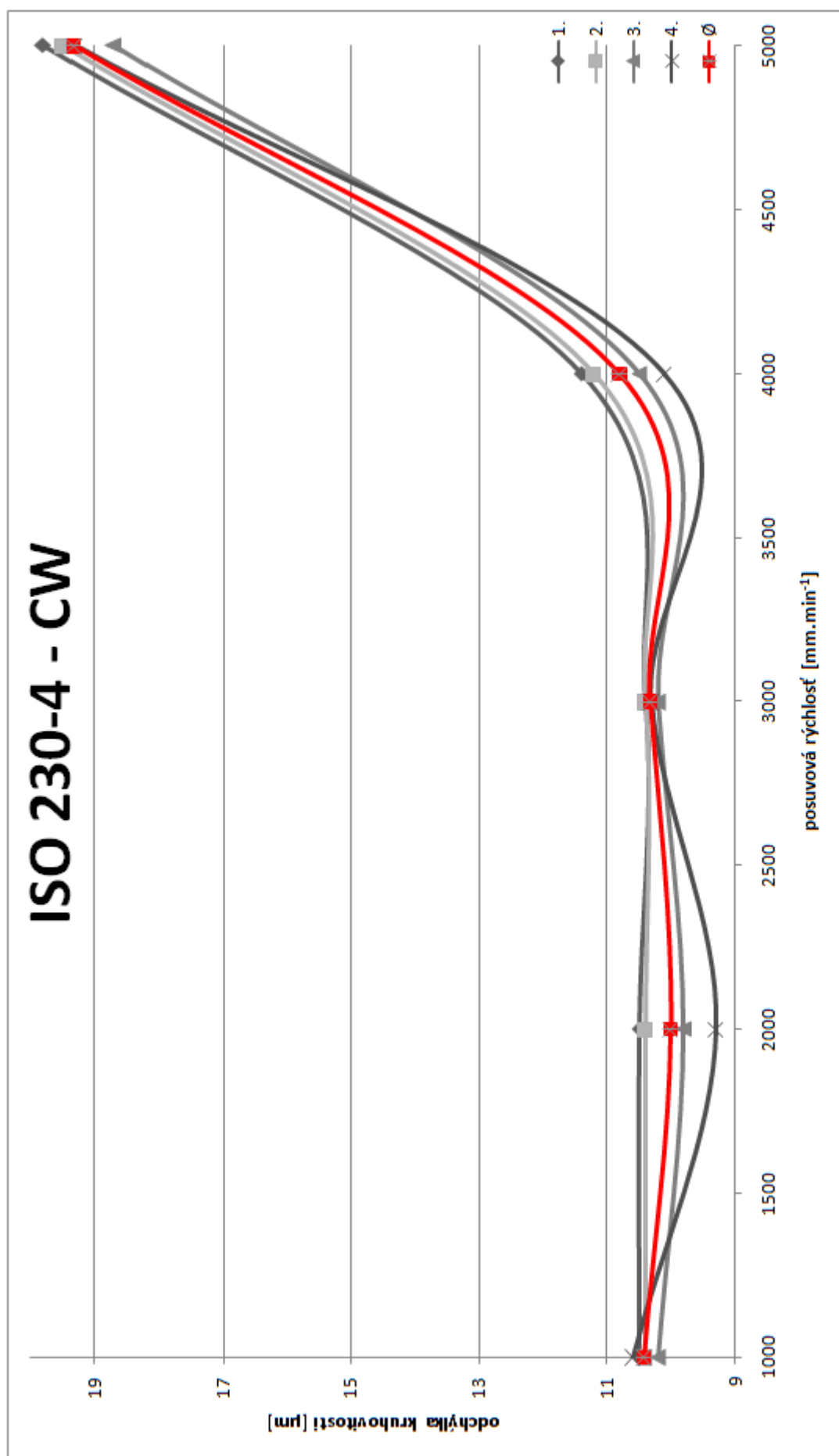
Odchýlka kruhovitosti v tabuľke 4 narastá s posuvovou rýchlosťou. Hodnoty odchýlky sú merané v smere hodinových ručičiek (CW). Pri každej rýchlosti sa hodnoty líšia len mierne. Jedine rýchlosť 2000 mm.min⁻¹ pri 4. meraní má o niečo menšiu odchýlku kruhovitosti. Môže to byť spôsobené nepresnosťou riadenia – nepresnosť číslícového riadenia a programovania prípadne interpoláciou, ale aj nepresnosťou odmeriavacieho zariadenia Ballbar.

Graf zobrazuje odchýlku kruhovitosti v smere CW. Hodnota kruhovitosti je $10,4 \mu\text{m}$ pri posuvovej rýchlosti $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a druhom meraní.



Obr. 5.7 – Graf odchýlky kruhovitosti v smere CW pri $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Obr. 5.8 zobrazuje jednotlivé odchýlky kruhovitosti v smere hodinových ručičiek. Hodnoty odchýlok sú do $3000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ zobrazené skôr lineárne, ako to bolo aj v prípade Ballbar hodnotenia. Z grafu dost' vyskakuje hodnota posledného merania ($2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) $9,30 \mu\text{m}$, ktorá sa líši od ostatných o viac než $1 \mu\text{m}$. Pri vyšších rýchlostiach je zrejmé, že odchýlky budú exponenciálne narastať.



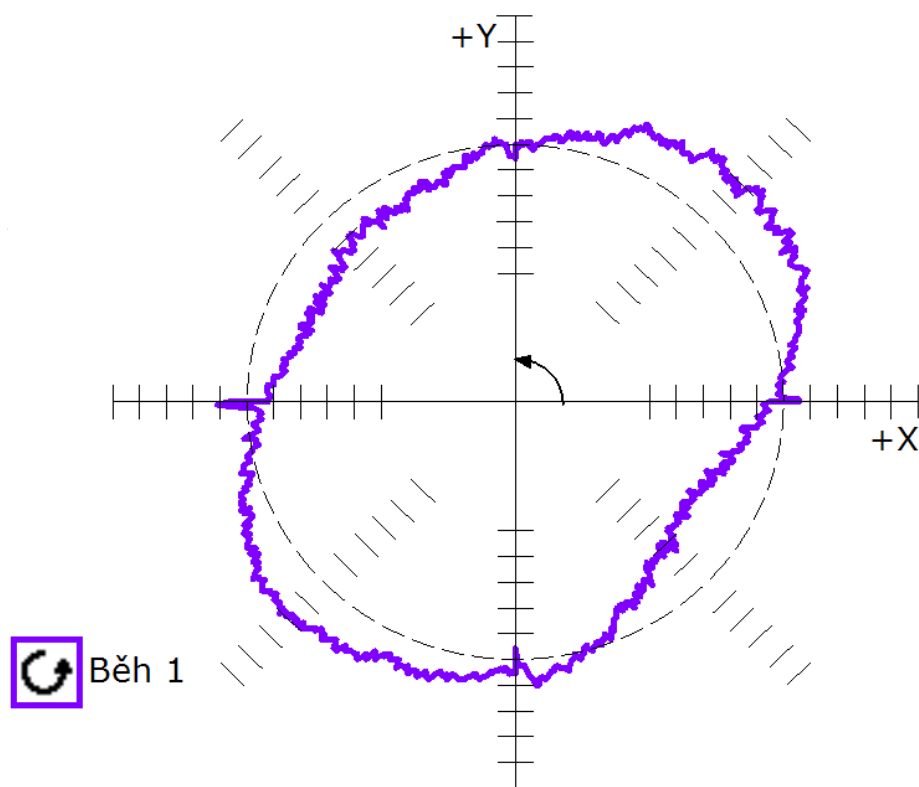
Obr. 5.8 – Graf odchýlok kruhovitosti v smere hodinových ručičiek CW

5.6.2 Odchýlka v protismere hodinových ručičiek

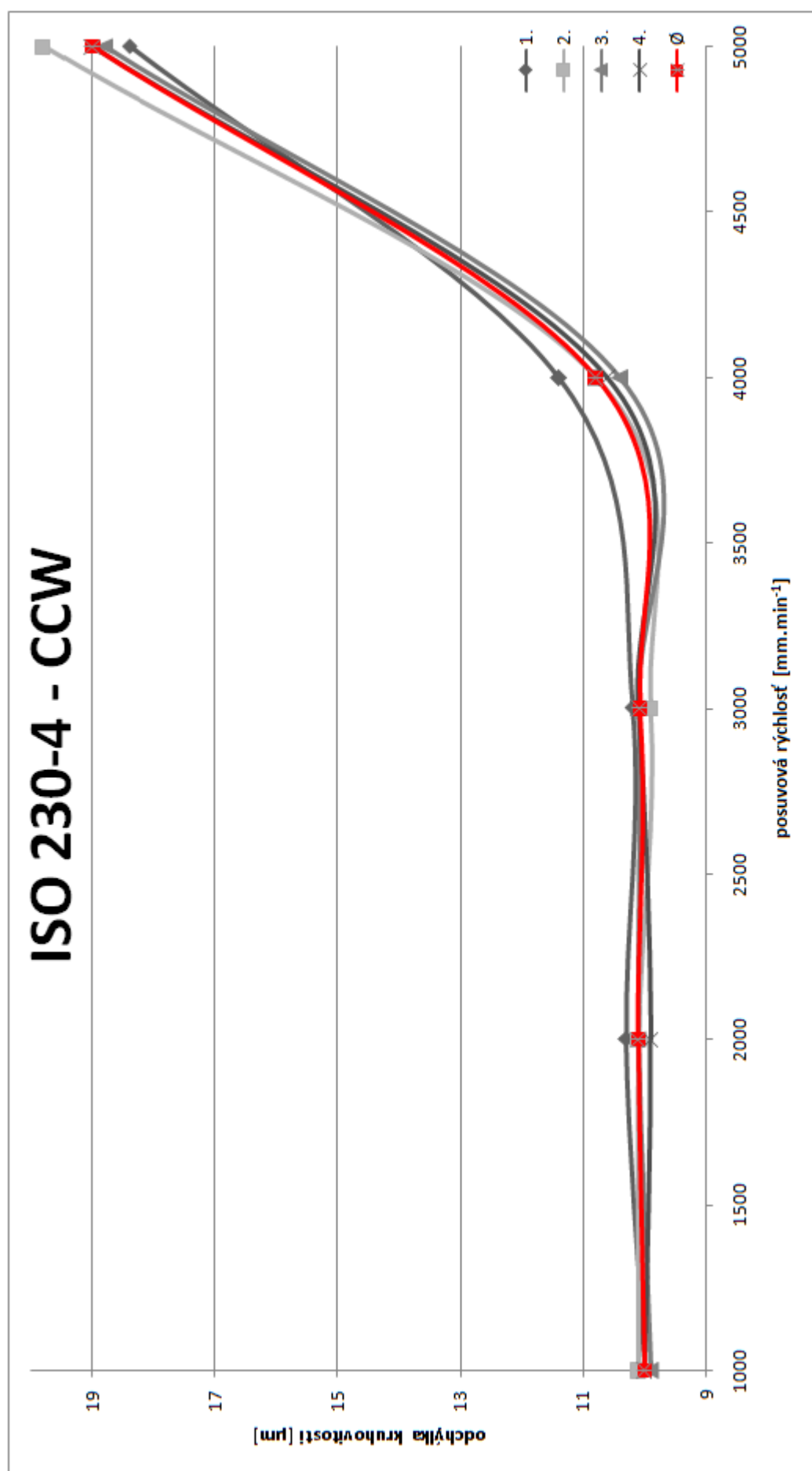
Tab. 5 – Hodnoty odchýlok – protismer hodinových ručičiek

CCW - CounterClockWise - protismer hodinových ručičiek					
č. m.	POSUVOVÁ RÝCHLOSŤ [mm.min ⁻¹]				
	1000	2000	3000	4000	5000
1.	10,00 μm	10,30 μm	10,20 μm	11,40 μm	18,40 μm
2.	10,10 μm	10,10 μm	9,90 μm	10,80 μm	19,80 μm
3.	9,90 μm	10,10 μm	10,10 μm	10,40 μm	18,80 μm
4.	10,00 μm	9,90 μm	10,10 μm	10,60 μm	19,00 μm
Ø	(10,00 ± 0,07) μm	(10,10 ± 0,14) μm	(10,07 ± 0,10) μm	(10,80 ± 0,37) μm	(19,00 ± 0,50) μm

Graf odchýlky kruhovitosti v smere CCW. Hodnota kruhovitosti je 10,1 μm. Od smeru CW sa líši o 0,3 μm. Ostatné hodnoty sa líšia maximálne o 0,6 μm. Väčšia odchýlka kruhovitosti je v smere CW, ktorú sme zistili podľa priemernej hodnoty so smerodajnou odchýlkou. Líšia sa jedine hodnoty pri rýchlosti 2000mm.min⁻¹, kde odchýlka v smere CW je menšia o 0,1 μm ako pri smere CCW.



Obr. 5.9 – Odchýlka kruhovitosti v smere CCW pri posuvovej rýchlosti 2000 mm.min⁻¹



Obr. 5.10 – Graf odchyľok kruhovitosti v protismere hodinových ručičiek CCW

5.6.3 Obojsmerná odchýlka

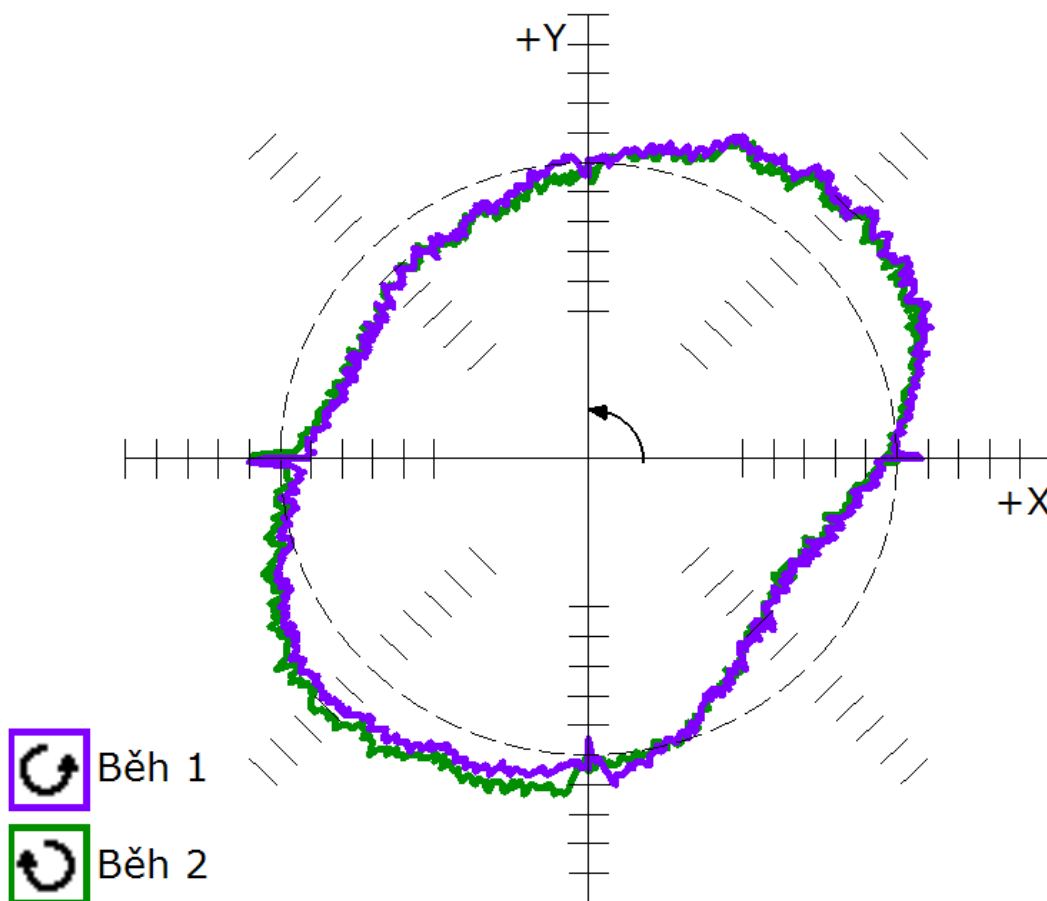
Minimálny rozdiel polomerov dvoch sústredných kružníc, ktoré tvoria obálku dvoch skutočných dráh nasnímaných v smere (CW) a proti smere (CCW) hodinových ručičiek tvorí obojsmernú odchýlku kruhovitosti. Obr. 5.11 zobrazuje obojsmernú odchýlku kruhovitosti podľa normy ISO 230-4 pri nastavenej hodnote posuvovej rýchlosti 2000 mm.min⁻¹.

Odchýlka kruhovitosti G (CW /CCW) = Max. hodnota – Min. hodnota nameraná Ballbarom.

Tab. 6 – Obojsmerná odchýlka podľa ISO 230-4

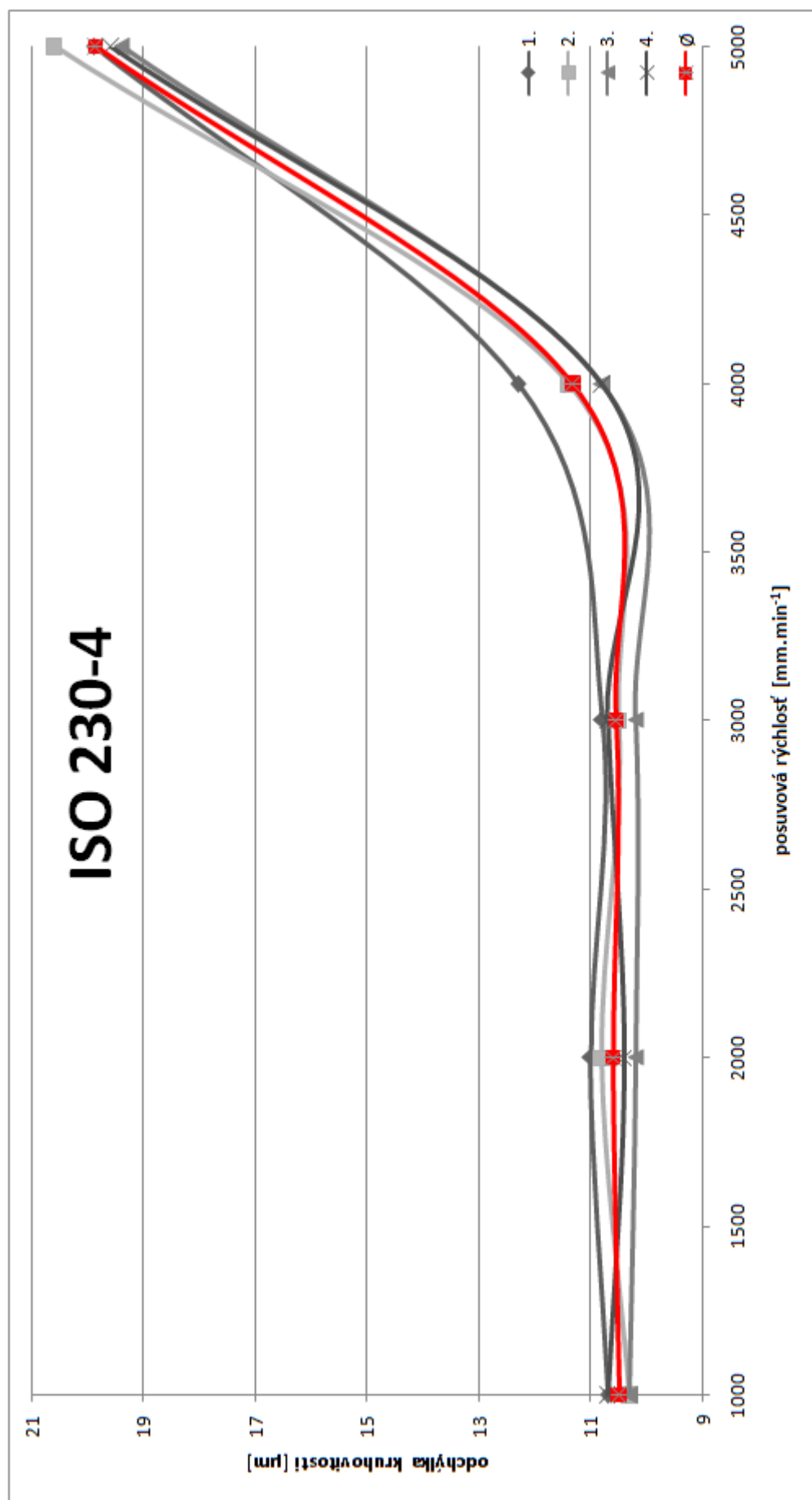
OBOJSMERNÁ ODCHÝLKA					
ISO 230-4					
č. m.	POSUVOVÁ RÝCHLOSŤ [mm.min ⁻¹]				
	1000	2000	3000	4000	5000
1.	10,70 μm	11,00 μm	10,80 μm	12,30 μm	19,90 μm
2.	10,30 μm	10,80 μm	10,50 μm	11,40 μm	20,60 μm
3.	10,30 μm	10,20 μm	10,20 μm	10,80 μm	19,40 μm
4.	10,70 μm	10,40 μm	10,70 μm	10,80 μm	19,60 μm
Ø	(10,05 ± 0,20) μm	(10,60 ± 0,31) μm	(10,55 ± 0,22) μm	(11,32 ± 0,61) μm	(19,87 ± 0,45) μm

Pri obojsmernej odchýlke podľa normy ISO 230-4 je výstupný graf iba jeden. Je to spojenie dvoch grafov zo smeru CW a CCW. Program odchýlky porovná a vykreslí na základe ich kombinácie spoločný graf. Na obr. 5.11 je znázornená odchýlka kruhovitosti s hodnotou $10,80\text{ }\mu\text{m}$. Pri porovnaní noriem Ballbar a ISO sa hodnoty menia. Najviac zmien je zaznamenaných pri rýchlosti 4000 mm.min^{-1} .



Obr. 5.11 – Obojsmerná odchýlka kruhovitosti pri 2000 mm.min^{-1}

Na Obr. 5.12 sú zobrazené hodnoty obojsmernej odchýlky kruhovitosti. Červenou farbou je zvýraznený priemer odchýlok, ktorý by mal zvyšovaním posuvovej rýchlosti exponenciálne stúpať, čo potvrdzuje aj graf. Podobné zobrazenie je aj pri Ballbar diagnostike. Ak by bolo uskutočnených viac meraní, graf by bol vykreslený presnejšie, a tým by sme dostali podrobnejšie hodnotenie obrábacieho stroja.



Obr. 5.12 – Graf obojsmernej odchyľky kruhovitosti podľa ISO 230-4

6 Vyhodnotenie merania systémom Ballbar

6.1 Technické zhodnotenie

Na vyhodnotenie výsledkov merania sme použili softvér Ballbar od firmy Renishaw. Vyhodnocovali sme odchýlku kruhovitosti pri nezaťaženom stroji. Softvér obsahuje etalóny, podľa ktorých vyhodnocuje chyby stroja. Meranie prebiehalo na CNC frézke HAAS MiniMill. Stroj pre uskutočnenie meraní musel byť zmontovaný a plne funkčný. Všetky funkčné skúšky boli uskutočnené ešte pred meraním. Skúšky kruhovej interpolácie sa uskutočnili pri nezaťaženom stroji, to znamená bez obrobku. Meranie prebiehalo na ohriatom stroji, aby sme predišli rozdielu teplôt na stroji a meracom prístroji, čo by mohlo spôsobiť výrazné chyby v meraní. Stroj aj merací prístroj bol chránený pred prievanom a vyžarovaním vonkajších zdrojov (slnečné žiarenie, tepelné zdroje).

Stroj nevykazoval veľmi veľké odchýlky kruhovitosti. Normy Ballbar a ISO vyhodnotili merania podobne, len s veľmi malými rozdielmi odchýlok. Zvyšovaním posuvovej rýchlosti odchýlky narastali, ale to sme aj predpokladali. Na základe priameho merania je možné do určitej výšky mechanických odchýlok zadávať korekcie do riadiaceho systému pre zlepšenie presnosti obrábacieho stroja. Po zadaní korekcie do riadiaceho systému nasleduje kontrolné meranie obrábacieho stroja priamym meraním podľa ISO230-4, z tohto merania je spracovaný protokol. Ako odporúčenie pre údržbu je vhodné uskutočňovať plánovaný zber dát podľa plánu a sledovať vývoj nameraných dát.

6.2 Ekonomické zhodnotenie

Ekonomický prínos merania presnosti systémom Ballbar QC20-W a preventívnych prehliadok strojov je v každej prevádzke nespochybniteľný. Sledovaním trendu vývoja nepresností na CNC strojoch môžeme výrazne znížiť náklady na opravy chybné uskutočnených operácii na obrobku a náklady vzniknuté nečakaným odstavením stroja. Dajú sa plánovať opravy a nastavenia stroja na vhodné termíny, z toho plynie optimalizácia plánovania údržby. Vystavením protokolov o presnosti stroja a výrobnej presnosti podľa medzinárodných štandardov prispieva k vytvoreniu pozitívneho obrazu o kvalite a schopnostiach firmy v očiach zákazníkov a obchodných partnerov.

7 Záver

Cieľom diplomovej práce bolo zistiť hodnoty odchýlok kruhovitosti pri zvyšovaní posuvovej rýchlosti na CNC frézke HAAS MiniMill a tým aj celkový stav frézky. Pri analyzovaní presnosti stroja s rôznymi veľkosťami posuvu, sme dospeli k záveru, že pri väčších posuvoch stroj pracuje menej presne ako pri posuvoch menších, čiže aj presnosť obrobku je nižšia. Pri vyššom posuve sa odchýlka kruhovitosti zväčšila približne dvojnásobne, čím by sa zväčšila aj výsledná drsnosť obrobku a tvar obrobku by neodpovedal skutočným hodnotám. Aj keď sa chyby zväčšovali, nie je možné posúdiť, či sú natoľko veľké, aby sme vedeli povedať, že stroj potrebuje neplánovanú opravu alebo stroj ponecháme v prevádzke. Nedokážeme to kvôli etalónom a hodnotám od výrobcu stroja, podľa ktorých by sme to vedeli posúdiť. Výrobca stroja neudáva minimálnu odchýlku kruhovitosti, pri ktorej je možné frézku používať bez opravy a do akej triedy presnosti ju zaradiť.

V dnešnej dobe sa od strojov požaduje, aby ich stav bol bezchybný, ich prevádzka spoľahlivá, náklady na prevádzku optimálne, prevádzka bola bezpečná ako z hľadiska obsluhy, tak aj z hľadiska obrobkov. Úlohou technickej diagnostiky je odhaľovať skryté chyby strojov, identifikovať miesto, kde porucha vzniká alebo vznikla a stanoviť jej rozsah a hlavné príčiny. Diagnostik stanovuje diagnózu stroja, prípadne prognózu pravdepodobného vývoja stavu stroja.

Namiesto bežných CNC obrábacích strojov je lepšie používať HSC CNC obrábacie stroje, pretože pri HSC obrábaní môžeme použiť väčšie posuvy a vyššie rýchlosti obrábania pri zachovaní požadovanej presnosti obrobkov.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Robertovi Čepovi, Ph.D. za odborné rady, pripomienky a odkaz na literatúru, ktoré výraznou mierou prispeli k vypracovaniu diplomovej práce.

Ďalej ďakujem konzultantovi pánovi Ing. Ryszardovi Konderlovi, Ph.D. za jeho rady a drahocenný čas, ktorý mi venoval pri riešení danej problematiky a pri meraní na stroji.

Použitá literatúra

- [1] DEMEČ, P. *Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie*, Edícia vedeckej a odbornej literatúry – SĽF TU v Košiciach, Vienaľa Košice 2001 15-28 s. ISBN 80-7099-620-X.
- [2] *Meranie a nastavenie geometrickej presnosti strojov* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.suppservice.eu/ponuka-sluzieb/meranie-a-nastavenie-geometrickej-presnosti-strojov>
- [3] *Meranie laserovým interferometrom* [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://servis.bost.sk/produkty/diagnostika-laserovym-interferometrom>
- [4] BOROVIČKA, M., JANÁČ, A., GÖRÖG, A. *Metrológia*. STU Bratislava, 2005. 65-71 s. ISBN 80-227-2198-0.
- [5] *Diagnosticke zariadenia monitorujúce stav obrábacích strojov* [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/546-diagnosticke-zariadenia-monitorujuce-stav-obrabacich-strojov>
- [6] *RENISHAW* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/Nase-spolecnost--6432>
- [7] [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.strojotechnika.hr/wp-content/uploads/2011/02/Ren.jpg>
- [8] ĎURICA, I.: *Multiparametrická diagnostika CNC obrábacích strojov*. ŽU Žilina, 2009. Dizertačná práca.
- [9] BOČEK V., DRÁBEK F. *Výroba a kontrola výrobných strojov*, Praha SNTL, 1997
- [10] BACH P., URBÁNEK S. *Skúšanie obrábacích strojov*, Košice ES VŠT, 1990
- [11] [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/system-qc20-w-ballbar--11075>
- [12] [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: http://www.empindustries.co/MiniMill_SC.jpg
- [13] [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.konstruovanie1.uniza.sk/Subory/Obr/obr6.29.png>
- [14] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. 2010.

Zoznam príloh

Príloha A - Výstupné grafy a hodnoty odchýlok kruhovitosti všetkých meraní z programu Renishaw Ballbar v elektronickej forme.